



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 박사학위논문

보행자의 의사결정과정을 고려한  
이동행태모형 개발

2016년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과

한 명 주

# 보행자의 의사결정과정을 고려한 이동행태모형 개발

지도교수 이 영 인

이 논문을 도시계획학 박사학위논문으로 제출함  
2015년 10월

서울대학교 환경대학원  
환경계획학과  
한 명 주

한명주의 도시계획학 박사학위논문을 인준함  
2016년 1월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 국문초록

지속가능한 친환경 수단으로 보행이 활성화되면서 보행공간에 대한 계획 및 운영이 중요하게 인식되고 있다. 이와 함께 보행행태에 대한 관심이 증가하고, 보행행태를 반영한 보행공간 평가 툴의 필요성이 대두되었다.

보행행태는 보행행태 선택단계에 따라 전략, 전술, 실행단계로 구분되며, 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다. 거시적 관점의 연구는 모형구조가 단순하고 적용이 용이하여 널리 활용되었으나, 보행자 간 상호작용을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이에 최근 개별보행자 단위의 미시적 관점 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 대부분 연구가 보행행태가 보행자의 의사결정과정이라는 사실을 간과하고 있다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정이 반영된 보행이동행태모형을 개발하고, 이를 보행자 시뮬레이터(P-Sim)에 구현하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하여, 보행공간의 분석에 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당하고, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 다루고 있다. 보행이동행태모형은 크게 5가지 특성을 가지고 있다. 첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현하며, 둘째, 본 모형의 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 셋째, 보행이동행태는 의사결정과정이며, 개인의 주관성, 불확실성, 애매함 등 특성을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 퍼지추론 접근 방식을 활용하였다. 넷째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 마지막 특성으로 보행이동행태는 의사결정단계와 실제 행동단계 2가지로 구분된다. 의사결정단계는 환경적 요인, 개별특성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는 과정이며, 이때 수



정가능성은 IF-THEN 규칙, 소속도 함수, 퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 산정된다. 실제행동단계는 의사결정단계의 수정가능성을 고려하여 실제 이동을 구현하는 과정으로, 본 연구에서는 널리 활용되고 있는 Social Force Model를 이용하였다.

보다 정교하고 객관적인 보행이동행태모형을 위해, 본 연구에서는 설문조사에 근거하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 이항로짓 모형을 이용하였고, 분석결과, 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 보행자 개별특성(성별, 연령, 통행목적), 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도), 물리적 환경 요인(보행공간의 폭)이 선정되었다. 남성이 여성보다, 연령이 적을수록, 업무통행일수록 또한 장애물과의 거리가 가까울수록, 장애물이 정면에 위치할수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높아지는 것으로 분석되었다. 통계적으로 유의미한 변수를 퍼지추론의 영향요인으로 선정하고, 설명변수와 종속변수 간 관계를 통해 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 또한 실제 장애물을 회피하는 보행이동행태 특성 조사를 통해 퍼지추론의 소속도 함수를 생성하여, 보다 현실적인 모형을 구축하고자 하였다.

마지막으로 개발된 모형을 P-Sim에 구현하고 현장조사자료와의 비교를 통해 검증 및 평가를 수행하였다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였다. 모형의 검증은 크게 개별자료가 집계된 거시적 보행교통류 특성비교와 개별보행자 단위의 행태비교로 구성된다. 거시적 보행교통류 특성인 속도, 밀도, 보행교통량을 대상으로 모형과 관측자료를 비교하고, 이때 평가지표는 RMSE, MAE, Theil의 부등계수를 사용하였다. 개별행태 검증은 보행자 궤적을 토대로 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 산정하고, 모형과 관측 분포의 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 살펴보았다. 분석결과, 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 본 모형이 거시적 보행교통류 특성을 설명하는 것으로 판명되었고, 개별행태 역시 관측과 동일한 분포를 보이는 것으로 조사되었다.

교통분야에서 차량교통에 비해 보행교통 연구는 상대적으로 소외되어 온 것이 사실이다. 보행은 인간이 선택할 수 있는 가장 기본적인 교통수

단으로써 모든 통행의 시작과 끝을 담당하고 있다. 또한 보행은 교통분야 외 다양한 측면(개인, 지역, 국가 차원)에서 편익을 창출하는 기능을 수행한다. 최근 보행의 중요성에 많은 사람들이 공감하고 있고, 이러한 변화와 함께 본 연구에서는 보행공간의 미시적 분석을 위한 보행이동행태모형을 개발하였다. 본 모형은 개별보행자 단위의 행태를 반영하고 인간의 사고에 기반을 둬으로써 기존 모형의 한계를 극복한 점에 있어서 의미가 있다. 이를 기반으로 보행공간의 계획 및 운영단계에서 다양하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 단순히 보행공간의 용량분석에 제한되지 않고, 새로운 보행시설 또는 보행정책의 도입 시 다양하고 미세한 보행공간 변화를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 보행이동행태, 의사결정과정, 퍼지추론, 사회역학모형, 이항로짓모형, 보행시뮬레이션  
**학 번:** 2006-31010

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구 배경 및 목적 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	4
제 2 절 연구 내용 및 구성 .....	5
제 2 장 이론적 배경과 선행연구 고찰 .....	8
제 1 절 보행행태 .....	8
1. 보행자 공간 .....	8
2. 보행특성 .....	10
제 2 절 지적 행위자 .....	16
1. 지적 행위자의 개념 .....	16
2. 계층적 의사결정과정 .....	18
제 3 절 선행연구 고찰 .....	20
1. 보행 연구 분류 .....	20
2. 보행행태 연구 .....	22
3. 보행공간 연구 .....	41
4. 선행연구의 시사점 .....	43
제 3 장 보행이동행태모형 개발 .....	45
제 1 절 보행이동행태 정의 .....	45
제 2 절 보행이동행태모형 구축 .....	50
1. 모형식 설정 .....	51

2. 보행이동행태 의사결정요인 선정 .....	54
3. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 .....	56
<b>제 4 장 보행이동행태모형 정산 .....</b>	<b>69</b>
제 1 절 보행이동행태 의사결정요인 선정 .....	69
1. 보행이동행태 선호조사 .....	69
2. 보행이동행태 의사결정요인 선정결과 .....	79
제 2 절 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 .....	86
1. IF-THEN 규칙 .....	87
2. 소속도 함수 .....	89
3. 퍼지연산 및 비퍼지화 .....	101
4. 가중치 적용 .....	102
<b>제 5 장 모형 구현 및 검증 .....</b>	<b>105</b>
제 1 절 검증방법론 .....	105
1. 분석시나리오 .....	106
2. 평가지표 .....	108
제 2 절 자료 구축 .....	111
1. 관측 자료 .....	111
2. 모형추정 자료 .....	118
제 3 절 검증 결과 .....	130
1. 거시적 보행교통류 특성 .....	130
2. 미시적 개별행태 .....	136
<b>제 6 장 결론 .....</b>	<b>140</b>
제 1 절 연구결과의 요약 및 시사점 .....	140
제 2 절 한계 및 향후 연구 과제 .....	142

참고문헌 .....	144
부록: 설문조사 .....	156
Abstract .....	160

## 표 목 차

<표 2-1> 성별, 연령별 평균 보행속도 .....	13
<표 2-2> 보행자 여건별 평균 보행속도 .....	14
<표 2-3> 보행 연구 분류 .....	21
<표 2-4> 보행자도로 서비스수준 .....	27
<표 2-5> 보행자 움직임 관련 선행연구 분류 .....	33
<표 3-1> IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부 .....	64
<표 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인 .....	70
<표 4-2> 보행이동행태 기타 영향요인 .....	72
<표 4-3> 보행이동행태 선호조사 개요 .....	73
<표 4-4> 보행이동행태 의사결정요인 변수설정 .....	75
<표 4-5> 영향요인과 수준설정 .....	75
<표 4-6> 보행이동행태 선호조사를 위한 시나리오 .....	76
<표 4-7> 응답자 특성 조사 결과 .....	77
<표 4-8> 시나리오별 수정가능성 응답결과 .....	78
<표 4-9> 로짓모형의 설명변수 설정 .....	79
<표 4-10> 이항로짓모형의 종속변수 설정 .....	81
<표 4-11> 로짓모형 추정결과 .....	83
<표 4-12> 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화 ·	84
<표 4-13> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화 ·	85
<표 4-14> IF-THEN 규칙 생성 .....	88
<표 4-15> 회피시작 시점에서 장애물과의 거리, 각도 특성 .....	93
<표 4-16> 거리, 각도 간 상관관계 .....	94
<표 4-17> 요인변수와 회피시작 시점의 이동방향 변화량 간 상관관계	95
<표 4-18> 퍼지변수 설정 .....	97

<표 4-19> 연령 변수의 소속도 함수 .....	98
<표 4-20> 장애물과의 거리 변수의 소속도 함수 .....	98
<표 4-21> 장애물이 위치한 각도 변수의 소속도 함수 .....	99
<표 4-22> 보행공간의 폭 변수의 소속도 함수 .....	99
<표 4-23> 상대속도 변수의 소속도 함수 .....	100
<표 4-24> 보행자 방향 또는 속도 수정가능성 변수의 소속도 함수 ..	100
<표 4-25> 변수의 가중치 설정 .....	103
<표 5-1> 모형의 검증 대상 .....	106
<표 5-2> 5분 단위 관측자료의 보행교통류 특성 및 서비스수준 ..	107
<표 5-3> 분석시나리오 설정 .....	108
<표 5-4> 유동인구 영상촬영조사의 시, 공간적 범위 .....	111
<표 5-5> 유동인구 영상자료 조사내용 .....	113
<표 5-6> 관측자료의 거시적 보행교통류 특성 .....	115
<표 5-7> 시나리오별 보행속도 분포의 정규성 검정 .....	115
<표 5-8> 관측자료의 미시적 개별행태 특성 .....	117
<표 5-9> P-Sim의 효과척도 산출 .....	125
<표 5-10> P-Sim의 입력자료 확인 .....	126
<표 5-11> 보행 OD 구축 .....	127
<표 5-12> 모형의 검증결과 .....	133
<표 5-13> 모형과 관측 간 속도 분포 동일성 검정 .....	137
<표 5-14> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 검정 .....	139

## 그 립 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도 .....	7
<그림 2-1> 보행자 공간 .....	9
<그림 2-2> 보행 목적에 따른 공간적 요구 차이 .....	10
<그림 2-3> 보행속도-밀도-보행량 관계 그래프 .....	11
<그림 2-4> 개별특성에 따른 보행교통류 차이 .....	15
<그림 2-5> 보행과 복잡계 .....	16
<그림 2-6> 함수, 객체, 행위자 간 관계 .....	17
<그림 2-7> 계층적 의사결정구조 .....	19
<그림 2-8> 행태에 변화를 가져오는 과정 .....	19
<그림 2-9> 보행 연구 분류 .....	21
<그림 2-10> 보행공간 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행) .....	29
<그림 2-11> Social Force Model에서 Social Force의 상호작용 .....	37
<그림 2-12> Magnetic Force Model의 감·가속도 .....	39
<그림 2-13> MSPM의 척력 .....	40
<그림 3-1> 보행이동행태의 위계 .....	45
<그림 3-2> 보행이동행태의 지적 행위자 .....	46
<그림 3-3> 보행이동행태의 단계 .....	47
<그림 3-4> 보행이동행태의 영향범위 .....	48
<그림 3-5> 보행이동행태 영향범위와 상호작용 .....	49
<그림 3-6> 실제행동단계와 의사결정단계의 상호연관성 .....	51
<그림 3-7> 일반집합(고전적 집합)과 퍼지집합의 특징 .....	57
<그림 3-8> 소속도 함수의 형태 .....	58
<그림 3-9> 퍼지집합이론을 이용한 언어적 변수의 정량화 .....	59



<그림 3-10> 퍼지추론 과정 .....	60
<그림 3-11> 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정 .....	63
<그림 3-12> Mamdani type의 퍼지추론 연산 .....	66
<그림 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인 .....	74
<그림 4-2> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 .....	85
<그림 4-3> Matlab의 이동물체 검지 .....	91
<그림 4-4> 영상자료 분석을 위한 보행특성변수 .....	92
<그림 4-5> 회피시작 시점에서 거리와 각도 관계 .....	94
<그림 4-6> 요인변수와 이동방향 변화량 관계 .....	95
<그림 4-7> 장애물까지 거리와 수정가능성 관계 .....	96
<그림 4-8> 장애물이 위치한 각도와 수정가능성 관계 .....	96
<그림 4-9> 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성 도출과정 ..	101
<그림 4-10> 조건부 속성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성	104
<그림 5-1> 관측자료의 속도-밀도 관계 .....	107
<그림 5-2> 검증방법론 .....	110
<그림 5-3> 영상조사지점도 .....	112
<그림 5-4> 시나리오별 거시적 보행교통류 특성 .....	114
<그림 5-5> 개별보행자 궤적 .....	116
<그림 5-6> 관측자료의 개별행태 특성 .....	117
<그림 5-7> 시뮬레이션 단계 .....	118
<그림 5-8> P-Sim의 객체지향 프로그래밍 기본 구성요소 .....	119
<그림 5-9> P-Sim의 클래스 위계 .....	120
<그림 5-10> 시뮬레이션 구조도 .....	121
<그림 5-11> P-Sim의 보행공간 정의 .....	123
<그림 5-12> P-Sim의 실행화면 .....	125
<그림 5-13> 시뮬레이션 네트워크 구성 .....	128
<그림 5-14> 모형추정자료의 보행교통류율, 속도, 밀도 관계 .....	129

<그림 5-15> 모형-관측 간 거시적 보행교통류 특성 비교 .....	131
<그림 5-16> 모형과 관측의 속도-밀도 관계 .....	134
<그림 5-17> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 1) .....	135
<그림 5-18> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 2) .....	135
<그림 5-19> 시나리오별 속도 분포 차이 .....	136
<그림 5-20> 모형과 관측 간 속도 분포 비교 .....	137
<그림 5-21> 시나리오별 이동방향 변화량 분포 차이 .....	138
<그림 5-22> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 비교 .....	139

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 배경 및 목적

### 1. 연구 배경

보행은 인간의 가장 기본적이고 기초적인 이동수단으로 모든 활동의 기반이 된다. 또한 지역공동체 구성원들을 다양한 사회·경제·문화적 기회들로 연결해주는 역할을 하고, 보다 건강하고 지속가능한 도시생활을 위한 필수적인 활동으로 인식되고 있다(오성훈·남궁지희, 2011). 교통측면에서 보행은 단거리 이동에서 그 자체가 교통수단이 되고, 비교적 장거리 이동에서는 승용차, 버스, 철도 등 다른 교통수단에 접근하는 보조적 수단이며, 수단간 연계기능을 담당한다. 즉, 보행은 가장 높은 수준의 접근성을 가지는 수단이다. 국토교통부(2011a)에 따르면, 전국 평균 보행의 수단 분담률은 32.0%로, 승용차 수단 분담률 32.1%에 이어 두 번째로 높다.<sup>1)</sup> 또한 보행은 교통수단 역할 이외에도 여가를 즐기거나 건강을 증진시키기 위한 수단이 되기도 한다. 최근 삶의 질과 친환경성이 강조됨에 따라 보행의 중요성은 더욱 강조되고 있다.

보행은 도시 내에서 기초적이고 핵심 교통수단임에도 불구하고 교통분야에서 다른 교통수단(승용차, 버스, 철도 등 차량 교통)에 비하여 관심이 부족한 실정이다. 또한 보행환경 개선을 위한 정책 및 투자 역시 소극적인 편이다. 보행자 통행보다 차량 통행을 우선하는 정책이 시행되어 왔으며 육교, 지하도 등 보행자를 배려하지 않는 시설이 설치되기도 하

---

1) 서울, 부산, 대구, 광주, 대전 등 대도시의 보행교통 수단 분담률은 승용차의 수단 분담률보다 높은 것으로 나타났다. 여기서, 보행 수단 분담률 산정은 5분 이상 통행을 기준으로 하였으며, 환승통행은 제외되며, 5분 이하의 통행이라도 통근이나 통학의 경우는 통행으로 인정된다.

었다. 또한 고가도로, 복개도로 설치 등 차량 위주의 시설 투자 사업이 활발하게 진행되었고, 교통신호체계 역시 지체최소화, 연동최적화 등 차량의 통행을 위주로 계획되었다. 이러한 차량 위주의 계획은 보행자를 한정된 좁은 공간으로 고립시켜 다양한 활동이나 시각적 즐거움을 제한하게 되었다. 즉, 보행자 및 사람을 배려하지 못하는 자동차 중심의 교통 정책 위주로 도시는 활발히 성장하여왔다.

최근 지속가능한 녹색교통정책의 흐름이 대두되고, 가치관이 변화하면서 비동력 교통수단(non-motorized transport)의 하나인 보행에 대한 재조명이 요구된다. 지속가능한 도시교통을 위한 기본적 토대가 되는 교통수단으로, 지역공동체 구성원들의 사회적·경제적·문화적 기회 매개체로, 도시 생활을 위한 필수적인 활동으로 보행이 점차 중요하게 여겨지고 이에 대한 인식의 전환이 필요하다. 또한 삶의 질 향상에 대한 요구가 커지면서, 사람중심의 교통체계, 건강을 중시하는 교통체계가 주목받고 있으며, 보행을 하나의 운동으로 보고, 건강한 도시 만들기의 중요한 요소로 인식되고 있다.

차량 위주에서 보행자 배려, 친환경 교통체계로 패러다임이 변화하면서 보행의 중요성과 함께 안전하고 편리하고 쾌적한 보행공간을 만들고자 하는 노력이 생겨나고 있다. 이동하기 위한 보행공간 뿐 아니라 머무는 대상공간, 즉 목적이 되는 보행공간으로 가치가 변화함에 따라 보행공간을 조성하고, 개선하고자 하는 역할이 점차 중요해지고 있다. 보행공간, 보행시설 등 보행환경 조성이 활발하게 이루어지고 있다. 전통적 보행공간 계획인 네덜란드 본엘프(Woonerf)를 시작으로 최근에는 뉴욕의 보행공간 확대 프로젝트, 런던의 보행자 중심 환경 조성, 파리의 자동차도로 폐쇄, 보행 전용공간 설치 등 해외 주요 도시들도 보행 중심, 친환경 위주의 교통정책 방향을 설정하고 있다(서울특별시, 2014a).

보행공간을 계획하고 운영하기 위해서는 보행자와 보행교통에 대한 이해가 우선되어야 한다. 또한 최근 추진되고 있는 다양한 보행관련 계획과 정책 사업을 평가하기 위한 보행공간 평가 틀이 필요하다. 이러한 평가 틀은 보행행태를 반영하여야 하며, 실제 보행자의 움직임을 정확히

모사하여야 한다. 또한 실제 현상을 분석할 수 있고, 보행환경에 미치는 영향을 분석하고 예측할 수 있어야 한다.

보행자의 움직임, 즉 보행행태는 보행자의 의사결정과정을 거쳐 발현된다. 의사결정과정은 계층적 구조를 가지며, 전략단계(strategic level), 전술단계(tactical level), 실행단계(operational level)로 구분 가능하다(Hoogendoorn et al., 2002). 첫째 전략단계는 보행 시작 이전에 출발시각 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 의사결정 단계를 의미한다. 둘째 전술단계는 활동스케줄링 및 중간목적지선택, 경로선택 등 의사결정을 수행하는 단계이다. 마지막으로 실행단계는 보행자가 실제로 주변 미시적 환경(장애물, 다른 보행자 등)과의 상호작용(interaction)을 수행하는 단계로, 보행이동행태(walking behavior)가 대표적이다. 특히, 실행단계의 보행이동행태는 계층적 구조를 가진 보행자 행태모형의 기초가 된다.

보행행태는 보행자와 공간의 다양성, 복잡성 등으로 인해 개별행태를 모형화하기는 어려우며, 특히 순간적으로 이루어지는 실행단계의 미시적 보행행태를 예측하는 것은 어렵다. 이러한 이유로 실행단계에 대한 연구는 전략단계, 전술단계의 연구에 비해 상대적으로 부족한 편에 속한다. 또한 실행단계에 속하는 보행이동행태에 관한 연구 중 상당수는 보행자 집단을 하나의 동질적이고 연속된 흐름으로 보고, 집계적 속성으로 분석하는 거시적 관점(macroscopic approaches)의 연구이다. 거시적 관점의 연구는 적용의 용이성 등의 이유로 광범위하게 사용되고 있으나, 보행자간, 보행자와 장애물간 상호작용을 고려하기에는 한계가 있다는 문제점을 가지고 있다. 최근 컴퓨터 기술 등의 발달로 인해 보행자 개별행태를 반영하고자 하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 개별보행자 단위(microscopic approaches)로 행태가 세분화될수록 보행행태에 영향을 미치는 요인은 다양해지며, 이를 반영하는 것은 매우 복잡해지는 어려움이 존재하나, 현실을 정확히 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

## 2. 연구 목적

지속가능한 친환경 수단으로 보행이 활성화되고 보행환경 조성 및 개선사업이 활발히 추진되면서 보행공간 계획과 운영이 중요하게 인식되고 있다. 이와 더불어 보행자의 움직임에 대한 메커니즘 즉, 보행행태에 대한 관심이 증가하고 보행공간 평가 툴의 필요성이 대두되었다.

보행행태 연구는 최근 보행인식변화와 함께 활발히 진행되고 있으나, 보행이동행태를 다루는 하위개념의 실행단계 연구는 행태의 복잡성으로 타 보행관련 연구에 비해 상대적으로 부족한 실정이다. 대다수 기존 연구는 보행행태를 하나의 동질적 흐름으로 보는 거시적 관점으로, 개별보행자 단위의 상호작용을 반영하지 못한다. 일부 개별보행자 단위의 연구가 기술발달과 함께 활발히 논의 중이나 단순히 주변 환경과의 상호작용만을 고려하고, 보행자의 의사결정과정을 간과한 모형들이 대부분이다.

따라서 본 연구는 기존 연구의 문제점을 개선하기 위한 실행단계의 미시적 보행이동행태모형을 개발하고자 한다. 여기서 ‘미시적’은 첫째, 계층적 의사결정구조 중 하위단계인 실행단계에 해당한다는 점과 둘째, 개별보행자 단위의 이동행태모형이라는 것을 의미한다. 본 연구의 보행이동행태모형은 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 방향 또는 속도 선택 행태를 의미한다. 또한 보행자 집단을 하나의 동질적 요소로 여기는 것이 아니라, 보행자를 자율성(autonomy)을 가진 하나의 지적 행위자(intelligent agent)로 보고 개개인의 독자적 특성을 반영하여 집단 전체의 흐름보다는 개별보행자의 움직임과 상호작용을 중심으로 모형을 구축한다.

이러한 과정은 보행자의 주관적인 효용을 최대로 하는 의사결정과정임과 동시에, 보행행태에 영향을 미치는 요인은 주관성, 부정확성, 애매함 등의 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 보행행태의 이런 특성을 토대로 보행이동행태모형에 퍼지추론(Fuzzy Inference) 과정을 적용한다. 퍼지추론은 애매하고 부정확한 과정을 정량화하는 기능을 가지고 있고, 불확실성하에서 인간의 의사결정을 모형화하는데 장점이 있다(Ross, 1995).

본 연구의 보행이동행태모형은 인간의 사고에 기반을 둔 의사결정과정을 모형에 포함함으로써, 기존 연구에서 고려되지 못한 인간의 사고를 모형에 구현하고자 한다.

보행이동행태 외 보행공간의 계획 및 운영 대안의 평가를 위해 보행공간의 시설물 이용행태, 대기행태 등을 포함한 P-Sim(보행자 시뮬레이터)<sup>2)</sup>에 본 모형을 구현하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하며, 보행공간 분석에 유용하게 활용될 수 있다. 또한 현장자료와의 검증이 부족한 기존모형의 한계를 극복하기 위해 실제 보행행태와 비교, 분석을 수행하여 모형의 신뢰성을 향상시키고자 한다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 거시적 보행교통류 특성과 개별보행자 단위의 행태 비교를 수행하였다.

## 제 2 절 연구 내용 및 구성

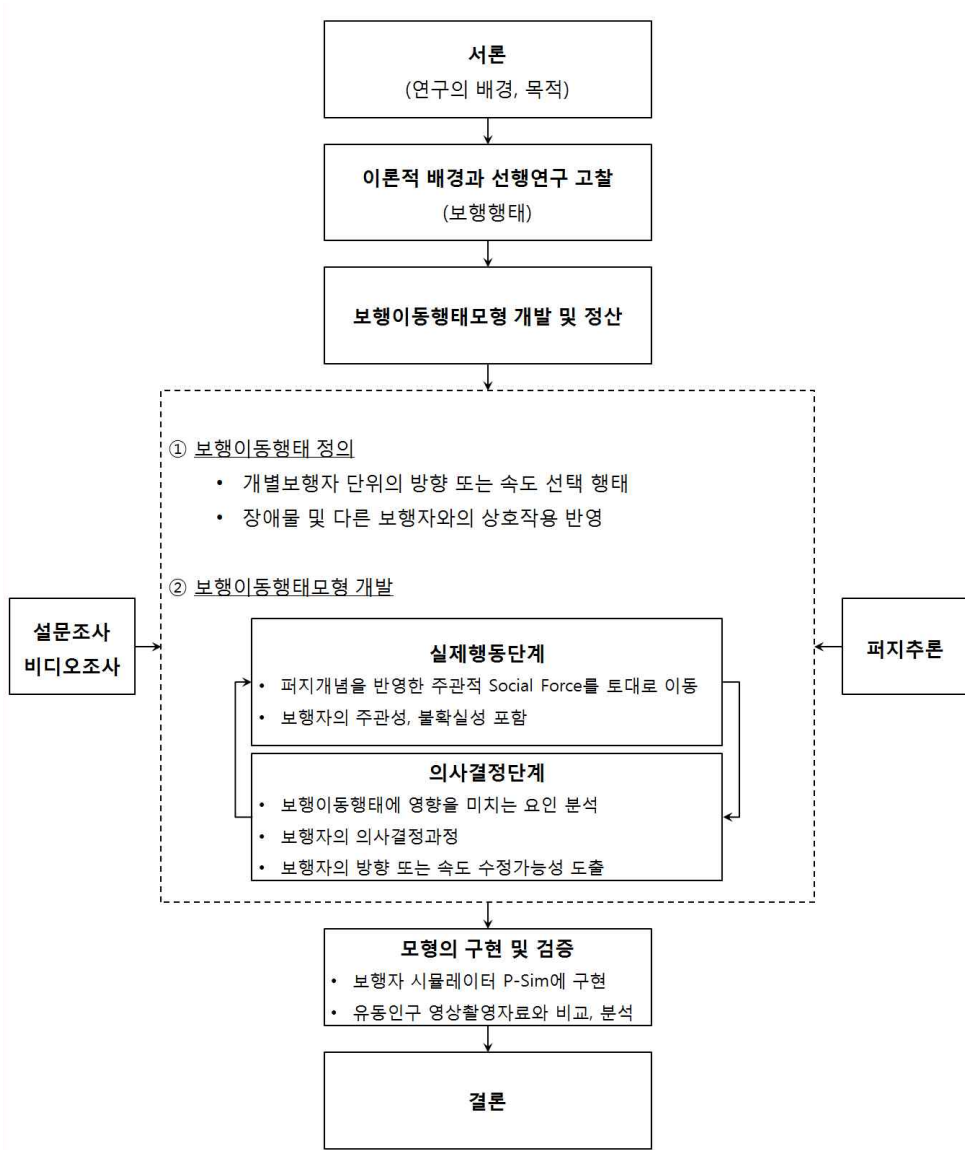
본 연구는 크게 개별보행자 단위의 보행이동행태모형 개발과 개발된 모형을 보행자 시뮬레이터에 구현하고 현장조사와의 비교를 통해 검증하는 내용으로 구분되며, 총 6장으로 구성된다. 1장에서는 보행이동행태모형의 필요성과 본 연구의 목적을 언급하고, 2장에서는 보행행태에 관한 선행연구를 검토한다. 보행행태는 보행행태 선택단계에 따라 전략, 전술, 실행단계로 구분되며, 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다. 3장은 모형개발 방법론으로, 모형개발에 앞서 먼저 보행이동행태를 정의한다. 또한 보행자 개별특성, 보행공간 특성 등 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 분석한다. 보행자의 보행이동행태는 크게

---

2) P-Sim은 Pedestrian Simulator의 약자로, 국가교통 R&D과제 ‘교통연계 및 환승시스템 기술개발’을 통해 개발된 보행자 시뮬레이터이다(국토교통부, 2011b). P-Sim의 개요 및 간략한 기능은 본 논문 pp. 118~126에서 제시하고 있다.

두 가지로 구분되는데, 첫 번째는 자율성을 가진 보행자가 주변 환경으로부터 영향을 받아 판단을 내리는 보행이동행태 의사결정단계이며, 두 번째는 의사결정을 기반으로 실제 행동을 이행하는 단계이다. 이때 의사결정단계와 실제행동단계는 서로 영향을 미친다. 보행이동행태는 보행자의 의사결정과정임과 동시에 보행자의 주관성, 불확실성 특성을 가지므로 퍼지추론을 기반으로 구현된다. 4장은 3장에서 제시된 모형의 정산과정을 포함하고 있으며, 보다 객관적인 모형을 구축하기 위하여 개별행태 모형과 보행행태자료를 활용한다. 5장에서는 3, 4장에서 개발한 보행이동행태모형을 보행자 시뮬레이터인 P-Sim에 적용하여 보행공간을 분석하는 툴을 구현하고 관측 자료와의 비교를 통한 모형의 평가와 검증을 수행한다. 6장에서는 연구 요약 및 시사점을 제시하고 향후 연구 과제를 도출한다. 본 연구의 흐름도는 <그림 1-1>과 같다.





<그림 1-1> 연구 흐름도

## 제 2 장 이론적 배경과 선행연구 고찰

### 제 1 절 보행행태

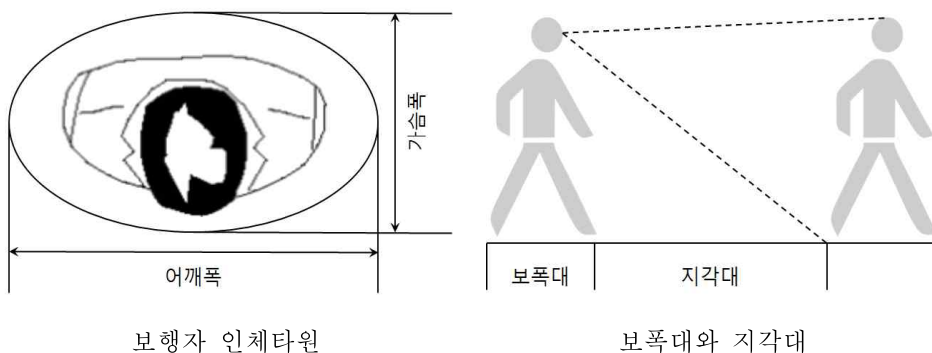
#### 1. 보행자 공간

보행행태를 이해하기 위해서는 보행자 공간에 대한 고려가 선행되어야 한다. 즉, 보행자가 필요로 하는 공간적 요구의 실체와 다양성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 보행자가 필요로 하는 공간은 보행자 신체가 점유하는 물리적 공간과 심리·경험적 측면으로 결정되는 사적영역인 완충공간(buffer zone)으로 구분된다(Fruin, 1971). 먼저 물리적 공간인 인체타원(body ellipse)은 보행자의 몸 두께와 어깨 폭 치수로, 보도 등에서 보행용량을 결정하고 보행공간이나 보행자를 위한 시설을 계획할 경우 기본적인 요소이다. 국가기술표준원(2004)는 20세 이상 한국인의 표준체형을 어깨너비 37.4cm, 가슴두께 20.6cm로 제시하고 있다. Fruin (1971)은 보행공간의 설계기준으로 폭 60cm, 두께 45cm인 인체타원을 제시하였으며, 이는 평균 인체 치수의 1.5~2배이다. 한편, 휠체어, 유모차를 이용하는 사람은 일반 보행자의 인체타원보다 상당히 큰 물리적 공간을 점유한다. 교통약자를 배려한 보행공간을 조성하기 위해서는 다양한 계층의 보행자 인체타원에 대한 고려가 필요하다.

완충공간은 보행자의 개인적인 공간으로 충돌을 피하기 위한 여유 공간의 개념이다. 보행자의 인지나 심리적인 측면이 완충공간에 영향을 주며, 완충공간은 보행자의 성별, 연령, 문화적 배경에 따라 다양하게 나타날 수 있다. Hall (1966)은 완충공간과 같은 개인적 공간이 관계의 친밀도나 개인의 특성에 따라 달라진다고 보고, 밀접거리(intimate distance), 개체거리(personal distance), 사회거리(social distance), 공중거리(public distance) 등 4가지 대인거리의 유형을 분류하였다. 먼저, 밀접거리는 46

cm 이하 거리에 해당하며 신체접촉과 속삭임이 가능한 거리로, 모든 감각이 밀착되어 불쾌감을 줄 수 있는 거리이다. 개체거리는 어느 정도의 친밀함이 전제되어 있어서 일상적 대화가 이루어지는 거리로 정의된다. 사회거리는 사무적 대화가 이루어지는 거리로 122~366cm 범위 내를 포함하며, 공중거리는 연설, 강의 등 공적인 발언이 이루어지는 거리로 366cm 이상으로 분류된다.

또한 보행동작에 필요한 공간은 보폭대(pacing zone)와 지각대(sensory zone)로 구성된다. 보폭대는 보행동작을 연속적으로 수행하기 위해 확보해야하는 최소거리로, 보행속도에 비례하며 직접 측정이 가능하다. 지각대는 보행이동행태를 위해 공간과 주변 상황을 지각하고 판단하기 위한 적정거리이다. 또한 시각 등 여러 가지 지각이나 심리적인 영향을 받을 수 있다. 인간의 눈은  $3^{\circ}\sim5^{\circ}$ 의 원추형 범위 내에서는 작고 상세한 것까지 볼 수 있으며, 일반적으로 사물을 쾌적하게 볼 수 있는 시야한계는  $60^{\circ}\sim70^{\circ}$ 이다. 계단이나 에스컬레이터를 이용하는 경우 시야가 좁아지며, 또한 다른 보행자의 머리부터 발끝까지 시야를 확보하려면 상대방에서 2m 정도 떨어질 필요가 있다. 지각대의 공간을 결정하는 요소는 인지반응시간인데, 이는 보행자에 따라 다를 수 있다(Fruin, 1971).



자료: Fruin(1971).

<그림 2-1> 보행자 공간

보행공간의 간격(spatial bubble)은 <그림 2-2>과 같이 보행목적에 따라 다양하다(Harris and Dines, 1988; WSDOT, 1997; 오성훈·남궁지희, 2011). 여기서 ‘간격’은 보행 중 장애물로 인해 전방 시야를 제한받지 않는 거리를 의미한다. 평상시 요구되는 보행공간의 간격은 4.6~5.5m 이나 쇼핑통행의 경우 2.8~3.6m, 산책은 10.6m 이상으로 통행목적에 따라 공간적 요구의 차이는 다양하다.



자료: Harris and Dines(1988).

<그림 2-2> 보행 목적에 따른 공간적 요구 차이

## 2. 보행특성

### 1) 보행자와 차량의 차이

보행자의 움직임은 차량에 비해 다양하고 복잡한 특성을 가지고 있다. 차량은 신호, 교통표지 등 도로의 각종 제어시설에 의한 특정 규칙을 기반으로 운행된다. 반면, 보행자는 동력에 의존하지 않고 자신의 신체를 통해 이동하므로 차량에 비하여 자율성과 임의성이 크고, 독자적이며 유연한 행태를 보인다. 또한 차량은 도로와 같이 물리적으로 한정된 공간에서 이동하는 반면 보행은 정해진 경로가 없다. 보행이 이루어지는 공간은 단순한 보도는 물론, 횡단보도, 광장, 지하철 환승역, 건물 내 보행

공간 등으로 다양하게 구성된다.

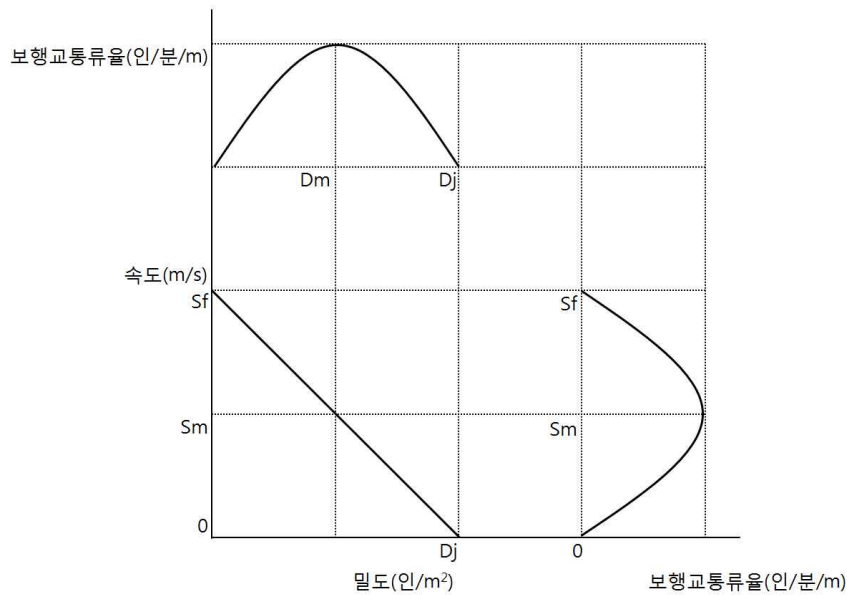
보행속도는 보행자의 특성(성비, 연령비 등), 보행목적, 보행공간, 보행 시간대(첨두시, 비첨두시), 보행환경(환승, 각종 이벤트, 긴급대피상황 등) 등에 따라 편차가 큰 것으로 조사되고 있다(Daamen, 2004). 또한 보행속도의 가·감속은 차량보다 상대적으로 크다. 따라서 보행에 대한 연구는 차량교통 연구와는 다른 접근 방법이 필요하다(이종호, 2008; Papadimitriou et al., 2009).

## 2) 거시적 특성

보행행태의 거시적 특성변수는 기본적으로 보행교통류율(인/분/m)  $V$ , 속도(m/분)  $S$ , 밀도(인/m<sup>2</sup>)  $D$ 이며, 관계식은 [식 2-1]과 같다.

$$V = S \times D$$

[식 2-1]



<그림 2-3> 보행속도-밀도-보행량 관계 그래프

여기서,  $S_f$ 는 자유속도(밀도가 0일 때의 속도),  $S_m$ 는 임계속도(용량에 도달했을 때의 속도),  $D_m$ 는 임계밀도(용량에 도달했을 때의 밀도),  $D_j$ 는 혼잡밀도(모든 이동이 정지하는 밀도)를 의미한다.

일반적으로 보행량과 밀도가 증가하면 보행속도는 감소하고, 보행밀도가 증가하여 1인당 차지하는 보행공간이 감소하면, 보행자의 이동성이 떨어지면서 전체적인 보행흐름의 평균속도는 감소하게 된다. 보행속도는 개인마다 차이가 있지만 일반적으로 보행공간의 밀도가 증가할수록 속도는 제한을 받는다(Fruin, 1971; Daamen, 2004). 특히 보행자 1인당 면적이  $2.5\text{m}^2/\text{인}$  이하로 줄어들게 되면 보행속도가 급격히 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Fruin, 1971).

### 3) 미시적 특성

보행행태는 개별특성에 따라 차이가 나며 심리적 요소, 환경적 요인 등 보행자에게 작용하는 내·외부적 요소로부터 복합적인 영향을 받아 다양한 형태로 나타난다(오성훈·이소민, 2013). 일반적으로 보행행태에 영향을 주는 보행자 개별특성으로는 연령, 성별, 문화, 인종, 통행목적, 소지품 유무 등이 있다(Daamen, 2004). 최근 유니버설 디자인(universal design) 등 장애의 유무나 연령 등에 관계없이 모든 사람들을 위한 보행공간 조성 및 정책 수립이 활성화되면서, 보행자 계층별 행태에 대한 관심이 증가하고 있다.

개별특성에 따른 보행속도와 관련된 초기 연구는 Fruin (1971)로 뉴욕과 펜실베이니아 역사를 대상으로 보행속도를 조사하였다. 조사결과, 남성의 보행속도는  $1.52\text{m/s}$ , 여성의 경우  $1.27\text{m/s}$ 로, 성별에 따라 보행속도는 차이가 나는 것으로 보고되었다. 또한 20~25세의 보행속도는  $1.37\text{m/s}$ , 81~87세는  $1.08\text{m/s}$ 로 조사되었으며, 65세 이후 고령자의 보행속도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

Fruin (1971) 이후 다양한 기존 연구 역시, 일반적으로 보행자의 나이가 많을수록 속도가 감소하는 것으로 관찰되었다. 65세 이상 고령 보행

자의 보행속도는 평균 보행속도보다 10m/분(0.17m/s) 정도 느리게 나타나고, 18~60세의 보행자와 60세 이상 보행자의 보행속도의 차이는 통계적으로 유의미한 것으로 조사되었다(Bowman and Vecellio, 1994; Knoblauch, et al. 1996). 또한 남성이 여성보다 보행속도가 빠른 것으로 알려지고 있다(Polus et al., 1983; Tarawneh, 2001). 또한 교통수단을 이용하거나 통근을 목적으로 하는 보행자들이 일반 시간제약이 없는 보행자에 비해 보행속도가 빠른 것으로 조사되었다(Finnis and Walton, 2008). 소지품 유무, 유아동반 여부 등에 따라 보행속도는 차이가 난다.

국내의 보행속도와 관련된 연구는 1982년 도로교통안전협회의 보행속도 조사로 16,681명을 대상으로 보행속도를 조사하였다. 조사결과 평균 보행속도는 1.26m/s 이며, 남자는 1.30m/s, 여자는 1.21m/s로 성별에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 연령대별 평균 보행속도는 연령이 높을수록 낮게 나타난다(<표 2-1> 참조).

<표 2-1> 성별, 연령별 평균 보행속도

(단위: m/s)

성별	남		여		평균
빠른 속도	1.69		1.56		1.63
느린 속도	0.97		0.93		0.95
평균 보행속도	1.30		1.21		1.26
인구비율	50.62%		49.38%		-
연령	20세 미만	20~40세	40~60세	60세 이상	평균
평균 보행속도	1.36	1.33	1.25	1.09	1.26
인구비율	25.60%	32.90%	27.80%	13.70%	-

자료: 도로교통안전협회(1982).

오성훈·이소민(2013)은 서울시 상업지역(신촌, 대학로, 종로, 가로수길 등)을 대상으로 보행자 유형별 보행속도를 조사하였다. 조사결과는 <표 2-2>와 같다. 총 15개 구간 각 50명의 보행자를 대상으로 보행속도를

조사한 결과, 서울시 상업지역 내 보행로의 보행속도 평균은 1.25m/s로 나타났다(최소 1.16m/s, 최대 1.38m/s). 남성이 여성보다 보행속도가 빠르며, 연령별 차이는 크지 않지만 21세~60세의 보행속도보다 60세 이상의 보행속도가 낮은 것으로 관찰되었다. 또한 혼자 이동하는 경우의 보행속도는 1.35m/s로 보행규모가 확대될수록 속도는 감소하고, 소지품 유무에 따른 보행속도 차이는 쇼핑백을 들고 가는 보행자의 속도가 1.09m/s로 가장 느린 것으로 조사되었다. 유모차를 동반한 보행자의 경우 유아를 보호하며 이동하므로 보행속도가 0.57m/s로 일반보행자의 절반 이하 수준으로 급감하는 특성을 보이는 것으로 분석되었다.

<표 2-2> 보행자 여건별 평균 보행속도

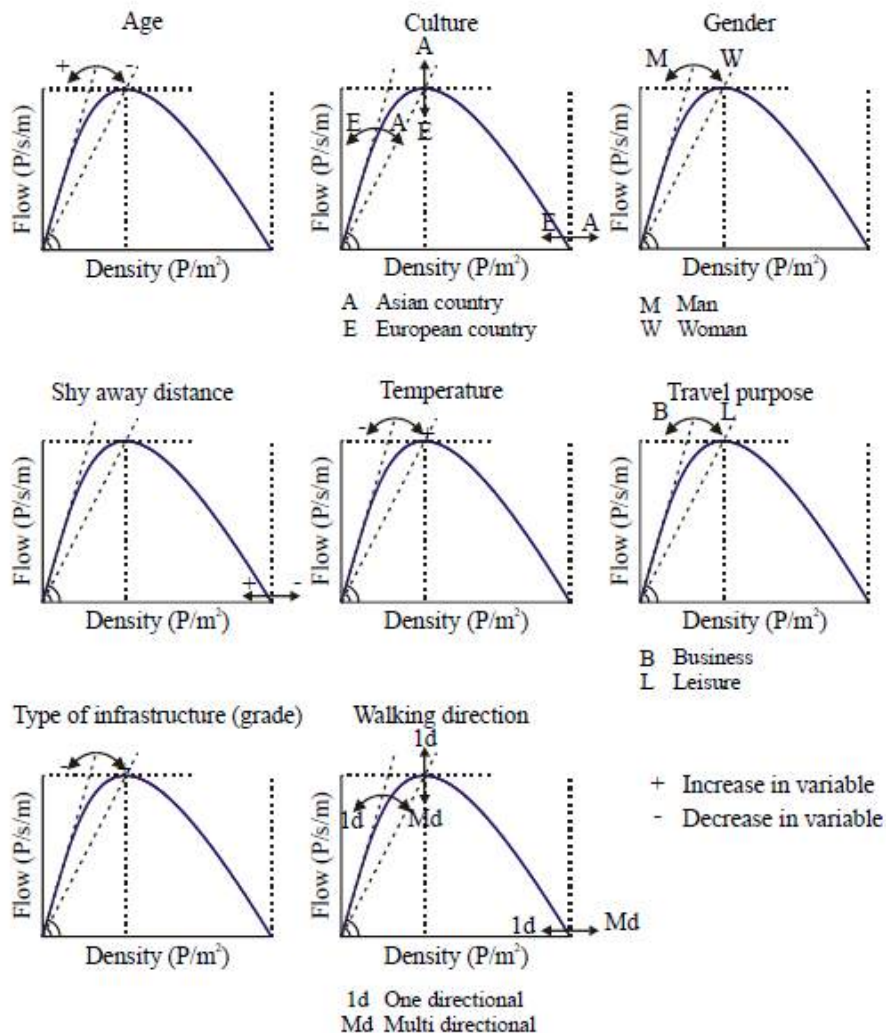
구분		평균 보행속도(m/s)
성별	남	1.27
	여	1.21
연령	20세 이하	1.20
	21~60세	1.25
	61세 이상	1.24
보행규모	1인	1.35
	2인	1.14
	3인 이상	1.09
목적	외부방문	1.15
	지역내 종사자	1.31
	기타	1.28
소지품*	1.09~1.33	
보행보조도구	전동휠체어	1.27
	유모차	0.57

주: \* 소지품 유무에 따른 보행속도는 휴대폰 1.25, 쇼핑백 1.09, 음료 1.24, 지갑 1.33, 옷 1.23, 담배 1.31, 서류 1.31, 기타 1.25m/s로 조사되었다.

자료: 오성훈·이소민(2013).



Daamen (2004)은 보행자의 개별특성과 보행속도 간 관계에 대한 기존 문헌을 검토하였는데, 일반적으로 연령이 높을수록, 여성보다는 남성이, 비업무보다는 업무 목적의 통행이 보행속도가 높은 것으로 조사되었다. 즉, 보행자 개별특성과 외부 환경 요인에 따라 보행류 모형은 차이가 나고 <그림 2-4>와 같이 표현된다(Daamen, 2004).



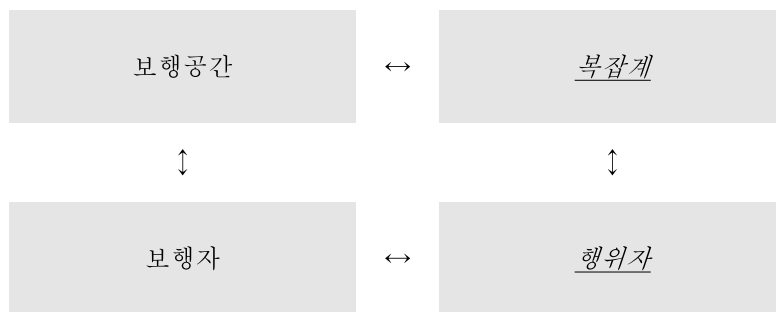
자료: Daamen(2004).

<그림 2-4> 개별특성에 따른 보행교통류 차이

## 제 2 절 지적 행위자

### 1. 지적 행위자의 개념

보행행태는 보행자의 개별특성, 주변 여건, 사회적·심리적 요인 등 복합적인 요소의 영향을 받기 때문에 이러한 행태 메커니즘을 정의하는 것은 어렵다. 이에, 최근에는 보행을 복잡계(complex system)<sup>3)</sup>의 한 요소로 보는 시각이 있다(이승재, 2013). 복잡계를 설명할 수 있는 가장 중요한 개념은 ‘창발 현상(emergence phenomena)’이다. 창발은 다양한 자연 및 사회현상에서 발견되는데 이를테면 사회에서의 집단행동(group dynamics), 뇌세포들이 만들어내는 기억이나 인지, 그리고 개별 행위자와 단위공간이 만들어내는 거대한 도시들은 창발의 예이다.

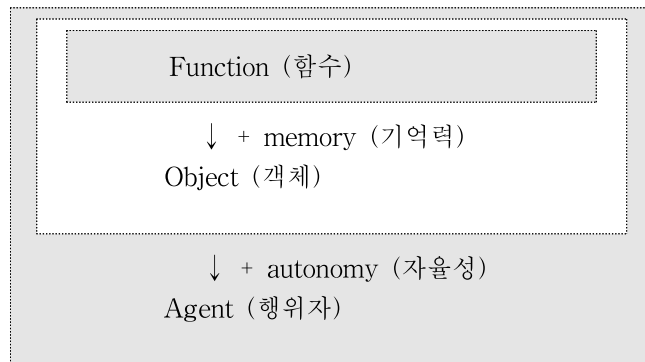


<그림 2-5> 보행과 복잡계

복잡계 해석 방법 중 하나인 행위자 기반 모형(agent based model)은

3) 수많은 구성요소들이 비선형 상호작용을 통해 얽혀 있어 거시적으로 보았을 때 창발현상이 나타나는 계를 의미하며 개별 행위자와 단위공간이 만들어내는 거대한 도시, 보행환경 등이 이에 해당한다(채승병 외, 2007; 이승재, 2013).

미시적 행위자의 특성에서 출발하여, 시뮬내기(simulation)를 통해 상향식(bottom-up)으로 거시적 현상의 동역학을 끌어내는 모형이다. 여기서 행위자는 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming)<sup>4)</sup>에서 이야기하는 객체(object)와 유사하며, 자기통제 및 자율적인 상호작용 능력이 부가된 것을 의미한다. 또한 학습능력과 적응능력을 갖춘 지적 행위자 개념으로 확장되기도 한다. 복잡계에서 관찰되는 행위자들은 몇 가지 특성을 가지고 있는데, 행위자는 이질적(heterogeneity)이며, 자율성을 가지고 있다. 또한 중앙에서 행동이 일괄적으로 통제되지 않고, 행위자가 가능한 선택 가운데 자신에게 가장 유리한 것을 선택하는 제한된 합리성(bounded rationality)을 기반으로 하여 의사결정을 수행하고 시스템 공간상의 주변 행위자와의 국소 상호작용(local interactions)을 한다. 행위자 기반 모형은 귀납적, 연역적 접근과 차별화되며, 생성적(generative) 접근 또는 구성적(constructive) 접근 방식으로 구성된다. 함수, 객체, 행위자 간 관계는 <그림 2-6>과 같으며, 행위자는 과거의 정보를 토대로 자율적으로 판단하는 능력을 갖는다(채승병 외, 2007).



자료: 채승병 외(2007).

<그림 2-6> 함수, 객체, 행위자 간 관계

- 4) 모든 데이터를 객체로 취급하여 프로그래밍 하는 방법으로, 처리 요구를 받은 객체가 자기 자신의 안에 있는 내용을 가지고 처리하는 방식이다. 객체지향 프로그래밍의 특성으로는 데이터의 자료추상화, 캡슐화, 정보은닉, 상속성, 동적결합 등이 있으며, 프로그래밍과 모델링에 강점을 가지고 있다.

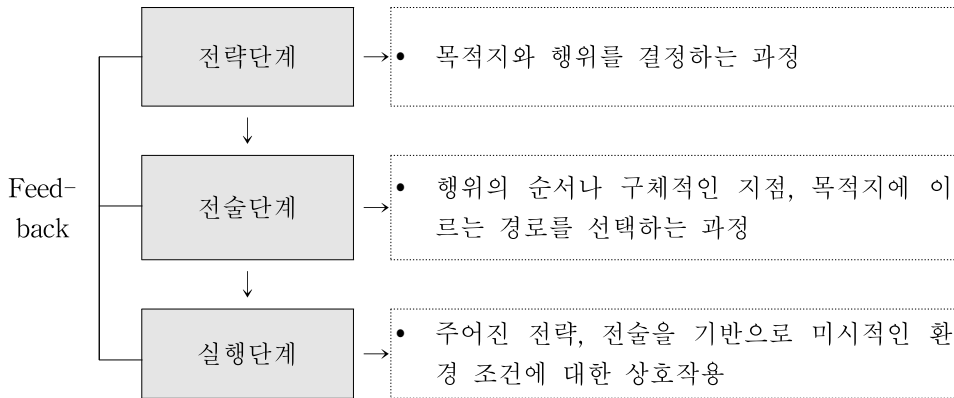
대체적으로 요구되는 행위자의 속성은 인식능력을 가질 것, 반응능력을 가질 것, 혼자 주어진 임무를 수행할 수 있을 것, 사회성이 있을 것, 변화하는 환경을 받아들이며, 적극적으로 대처를 할 수 있을 것, 지식습득능력이 있을 것 등으로 정의된다(이중호, 2003). 이와 유사하게, 문태현·성한욱(2006)에서 행위자 기반 모형의 특징은 특정 목적을 가진 사용자를 대신하여 작업을 수행하고, 각 행위자마다 고유의 속성과 지식을 가지고 있으며, 주변 정보를 취득하고 다른 행위자와 정보교환을 통해 의사결정을 수행하는 것이다. 또한 행위자는 환경의 변화를 인지하고 그에 대응하는 행동을 취하며, 학습기능을 가지며, 자신의 목적을 달성하기 위해 능동적인 자세를 가진다. 최근 복잡계에 대한 이해와 컴퓨터 기능의 향상으로, 복잡하고 임의적인 보행행태 구현을 위한 행위자 기반 모형이 활발하게 사용되고 있다(이중호, 2008; 이준, 2012).

## 2. 계층적 의사결정과정

Hoogendoorn et al. (2002)에 따르면 보행행태는 자극-반응과정이 아니며, 보행자의 자율성에 기반을 둔 의사결정과정이며, 계층적 구조를 가진다. 즉, 보행행태는 의사결정의 연속으로 볼 수 있으며, 보행자는 자신의 효용을 최대화 하는 의사결정을 수행한다. 계층적 의사결정과정은 <그림 2-7>과 같이 전략단계, 전술단계, 실행단계로 구분된다.

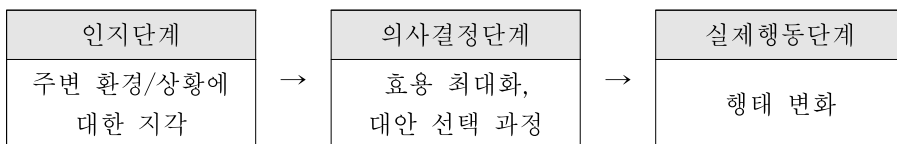
전략단계는 출발시간 또는 보행공간 내 목적지와 행위를 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정을 의미한다. 보행공간 내의 활동은 필수적인 것(mandatory)과 그렇지 않은 것(discretionary)으로 구분되기도 한다. 예를 들어 철도역사에서 표를 구입하기 위한 활동은 필수적 활동이며, 탑승 전 시간적 여유를 활용하여 신문을 구입하는 등의 행위는 필수적이지 않은 활동으로 분류될 수 있다. 전술단계는 활동스케줄링, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계이다. 경로선택의 경우 일반적으로 보행자는 목표지점에 이르는 최단거리를 선호하며, 같은 노력으로 최

대의 효과를 산출한다는 점에서 보행자는 효용을 최대로 하는 의사결정을 수행한다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 실행단계는 미시적 보행행태로, 장애물 회피 또는 다른 보행자와의 상호작용을 포함한 보행이동행태를 포함한다.



<그림 2-7> 계층적 의사결정구조

또한 의사결정과정을 통한 행태의 변화과정은 <그림 2-8>과 같이 인지단계, 의사결정단계, 실제행동단계로 구분되기도 한다. 보행행태도 이와 같은 단계로 분류될 수 있으며, 인지단계는 다양한 감각을 통해 주변 환경, 상황을 지각하는 과정을 의미한다. 이어, 개인의 효용을 최대로 하는 의사결정단계를 통해 실제 행태에 변화를 가져오는 실제행동단계를 수행한다(Helbing and Molnar, 1995).



<그림 2-8> 행태에 변화를 가져오는 과정

## 제 3 절 선행연구 고찰

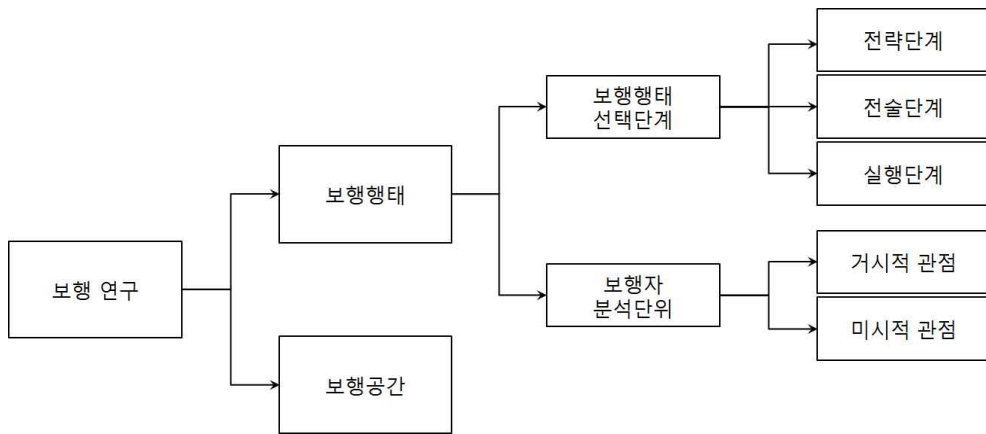
### 1. 보행 연구 분류<sup>5)</sup>

본 연구는 보행과 관련된 선행연구 중 보행자의 움직임 즉, 보행행태에 관한 연구와 보행공간 분석에 관한 연구를 검토한다. 첫째, 보행행태에 관한 연구는 보행자의 움직임에 초점을 맞추고 보행의 동적(dynamic)인 속성을 강조한다. 보행자의 움직임과 관련된 연구는 다시 보행행태 선택단계와 보행자 분석단위에 따라 세분된다. 앞서 살펴본 바와 같이 보행행태는 계층적 의사결정구조를 가지며 연속적인 선택행태를 가지고 있다(Hoogendoorn et al. 2002). 즉, 보행행태는 선택행태를 기준으로 전략단계, 전술단계, 실행단계로 구분되는데, 전략단계로는 보행자의 활동 선택 행태가, 전술단계는 활동스케줄링, 경로선택 행태가 대표적이다. 하위단계인 실행단계는 미시적 개념의 선택단계로 보행자의 이동행태 즉, 보행자와 다른 보행자 또는 장애물과의 상호작용을 반영한 보행이동행태 등이 포함된다. 이와 함께 보행자 분석단위에 의해 거시적 관점, 미시적 관점의 연구로 분류가능하다. 거시적 관점의 보행행태 연구는 보행자를 하나의 동질적이고 연속된 흐름(flow)으로 보며, 미시적 관점은 보행자를 독자적이고 독립적인 객체(individual object 또는 agent)로 보고 개별보행자 단위의 움직임과 상호작용에 주목한다.

둘째는 보행공간에 관한 연구로, 보행을 정적(static)인 개념으로 접근한다. 보행공간의 속성 분석과 함께, 속성과 보행량 간의 상관관계를 분석하여 공간의 사용패턴 등을 살펴본다. 공간의 속성을 정량적으로 분석하는 기법인 공간구문론(Space Syntax)을 활용한 연구가 대표적이며, 최근 인간의 가시접근성을 고려한 연구기법도 다수 활용되고 있다.

---

5) 한명주(2015)의 분류를 참조.



<그림 2-9> 보행 연구 분류

<표 2-3> 보행 연구 분류

구분			내용
보행행태 연구	보행행태 선택단계	전략단계	• 출발시간 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정을 의미
		전술단계	• 활동스케줄링 및 중간목적지 선택, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계
		실행단계	• 장애물 회피 또는 다른 보행자와의 상호작용을 포함한 보행행태를 포함 • 보행이동행태, 시설물 이용행태 등이 해당
	보행자 분석단위	거시적 관점	• 보행자를 하나의 동질적이고 연속된 흐름으로 접근 • 보행교통류 관계식을 기반으로 보행공간 서비스수준을 분석
		미시적 관점	• 보행자를 독자적이고 독립적인 객체로 보고 보행자의 움직임과 상호작용에 주목
보행공간 연구			• 보행공간 속성 평가: 공간구문론, VGA 등을 이용하여 보행량-보행공간 상관관계 분석

## 2. 보행행태 연구

### 1) 보행행태 선택단계에 따른 분류

보행행태는 자극-반응과정이 아니며, 보행자의 자율성에 기반하며, 인적요인(human factors)등을 고려한 복잡한 의사결정과정이라는 접근과 함께, 보행자의 선택과정에 초점을 맞춘 연구가 진행되고 있다. 선택과정은 계층적 구조를 가지며 각각의 과정은 서로 상호연관성을 가지고 있다(Hoogendoorn et al., 2002). 본 연구에서는 이러한 선택단계로 선행연구를 분류하고 각 과정의 특성을 살펴보고자 한다.

#### ① 전략단계

전략단계는 목적지와 행위를 결정하고, 출발시간 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정단계를 의미한다. 전략단계의 행태는 보행 목적에 따라 다양하게 나타날 수 있으며, 보행공간 내 활동은 필수적 활동(예를 들면, 열차를 타기 전 표를 사는 활동 등이 이에 해당)과 그렇지 않은 활동으로 구분되기도 한다. 일반적으로 전략단계는 보행환경 외적인 요인에 의해 결정되는 경우가 많고 보행자의 활동선택과 관련된 자료는 많지 않은 편이다. 초기 연구는 Borgers and Timmermans (1986)로, 도심 상업지구를 대상으로 보행자의 목적지 선택 모형을 제안하였고, Timmermans et al. (1992)는 Borgers and Timmermans (1986)의 모형을 네덜란드에 적용하였다. 또한 Zhu and Timmermans (2005)은 쇼핑 등 비업무 통행에 대한 의사결정과정을 휴리스틱(heuristic) 접근 방식을 통해 살펴보았다. Boarnet and Crane (2001)은 출발 전 보행자가 보행수단을 선택하는 의사결정에 미치는 요인에 대하여 분석하였다. 일반적으로 실행단계의 보행행태모형에서는 전략단계에서 이루어지는 행태를 외생변수로 간주하는 경우가 대다수이다



(Dammen, 2004).

## ② 전술단계

전술단계는 활동스케줄링 및 중간목적지 선택, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계이다. 즉, 행위의 순서나 구체적인 지점, 목적지에 이르는 경로를 선택하는 행태가 포함되며, 보행행태 연구 중 가장 활발히 진행되고 있는 분야이다.

보행자의 경로선택과정은 다양하고 복합적 요인과 함께, 잠재적 요인이 영향을 미칠 수 있으나(Hill, 1982), 보행자의 경로선택에 가장 큰 영향요인은 ‘이동거리’이다(Seneviratne and Morrall, 1985; Borgers and Timmermans, 1986; Bovy and Stern, 1990; Verlander and Heydecker, 1997; 안은희 외, 2004; Li and Tsukagichi, 2005; Gim and Ko, 출간예정)

Bovy and Stern (1990)은 이스라엘 예루살렘을 대상으로 보행자의 경로선택 행태를 조사한 결과, 피실험자의 2/3가 이동거리가 가장 짧은 경로를 선택하는 것으로 나타났다. Seneviratne and Morrall (1985), Verlander and Heydecker (1997)등에서도 보행자는 가장 단순하거나 이동거리가 짧은 경로를 선택하는 것으로 분석되었다. Seneviratne and Morrall (1985)는 캐나다 켈거리시의 보행자를 대상으로 보행경로에 대한 설문을 수행한 결과, 응답자의 75%가 최단거리를 선택하는 것으로 조사되었다. 해당 경로를 선택한 이유에 대하여는 응답자의 50%가 가장 빠른 경로라고 느끼기 때문이라고 응답하였으며, 20%는 습관적으로 경로를 선택했다고 응답했으나, 그 경로를 처음으로 선택하게 된 이유는 최단경로라고 인지했기 때문이라고 응답했다.

경로선택과 관련하여 이동거리 외에 경로의 매력도, 횡단보도의 수, 보도의 혼잡상태, 기상상태, 보행공간의 환경(소음, 청결도 등), 안전성 등이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 주변 상점, 오픈 스페이스, 지형 등이 보행자의 경로선택 요소로 제시되기도 하였다. 이러한 경로선택

행태의 영향요인은 도시마다 다양하게 나타나는 것으로 분석되었는데, 뉴욕은 경로선택에서 상점의 연접길이(percentage of retail frontage)가 가장 큰 영향을 미친 반면, 홍콩은 이동거리가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Guo, 2009; Guo and Loo, 2013). 또한 최단거리가 항상 선호되는 것은 아니며, 방향전환 관점에서 가장 단순한 경로를 선택하는 행태도 보이는 것으로 분석되었다(Marchand, 1974).

경로선택과 관련한 국내연구로, 안은희 외(2004)는 직선의 최단경로, 방향전환이 적은 경로, 밝은 쪽을 선호하는 행동패턴, 대다수의 사람이 형성하는 흐름 등을 경로선택 차원에서 의사결정에 영향을 미치는 요인으로 선정하였다. 보행자의 경로선택은 익숙도와 조명의 영향력이 가장 크며, 거리, 횡단보도, 가로시설 등이 영향을 미치는 경우도 있다(이인성·김현옥, 1998). Gim and Ko (출간예정)은 보행경로 선택요인에 대한 기존 연구를 검토하고, 서울시 강남역 주변의 보행자를 대상으로 설문조사를 수행하여 경로선택에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 응답결과, 응답자의 80%가 최단경로를 선택하는 것으로 조사되었다. 여기서 설문응답자가 선택한 최단경로는 엄밀한 의미에서 인지된 최단경로(perceived shortest path)를 의미한다.

경로선택 행태에서 보행자는 목표지점에 이르는 최단거리를 선호한다는 점에서 개인의 효용을 최대화하는 경제학적 개념을 추구한다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서, Hoogendoorn and Bovy (2004)는 보행자는 자신의 효용을 최대화하는 선택을 하는 것으로 가정하고, 외생변수(주변 환경적 요인), 내생변수(보행자 개별특성), 교통조건(보행로 혼잡 등) 등을 고려하여 보행자의 경로 및 활동스케줄링 행태를 구현하였다.

경로선택의 영향요인으로 수직이동요소를 고려한 연구도 일부 있다. 수직이동의 경우 이동거리, 시간 뿐 아니라 경사도 등이 경로선택과정에 영향을 미칠 수 있다. Cheung and Lam (1998)은 홍콩 MTR 역사를 대상으로 계단과 에스컬레이터(E/S)의 경로선택에 대한 연구를 수행하였으며, 윤상원·배상훈(2007)은 수직이동시설의 통행비용에 영향을 미치는 요인으로 시설 이용시 피로도, 인적요인(쾌적함 및 대기시간을 고려한

선호도), 시설의 층별 소요시간 등의 주관적 지표를 고려하였다.

최근 보행경로의 다양성을 반영하고 보행자들의 실제 통행을 구현하기 위한 social path의 개념이 등장하기도 하였다. social path는 보행자들이 보다 효율적인 통행을 위해 보행로가 아닌 다양한 경로를 활용하여 이동하는 경로를 의미한다(최성택 외, 2015).

### ③ 실행단계

실행단계는 미시적 환경조건에서 다른 보행자 또는 장애물을 회피하는 보행이동행태로, 보행자와 주변 환경 요인간의 상호작용을 포함한다. 이는 계층적 의사결정구조 중 가장 하위단계에 해당하며 보행자의 의사결정이 반영된 기초적인 보행행태이다. 최근 컴퓨터 기술의 발달하고 시뮬레이션 기법이 개선됨에 따라 미시적 접근의 연구가 활발하게 진행되고 있다(Asano et al., 2009; Robin et al., 2009; Asano et al., 2010).

실행단계의 보행행태에서 가장 대표적인 모형은 Magnetic Force Model (Okazaki, 1979)과 Social Force Model (Helbing and Molnar, 1995)이다. 이는 실행단계 보행행태모형으로 가장 광범위하게 적용되고 있으나, 주변 환경과의 상호작용을 통한 결정적 행태 모형으로 보행자의 의사결정과정을 반영한다고 보기에는 어려움이 있다. 반면 Hoogendoorn (2001)은 Hoogendoorn and Bovy (2004)의 경로선택 행태 연구와 동일한 접근방식으로, 보행자의 효용을 최대화하는 실행단계 모형을 구축하였다. 여기서 발생하는 비효용은 보행경로에서 벗어남, 보행자의 불편함, 급격한 감·가속 등으로 정의된다. 이산선택모형, 게임이론 등 개인의 효용을 고려한 실행단계의 보행행태 연구도 최근 활발히 진행 중이다 (Antonini et al., 2006; Asano et al., 2009). 실행단계에서 의사결정은 전략, 전술단계의 행태에 영향을 받는다. Ishaque and Noland (2008)는 보행자의 도로횡단 행태에 관한 연구를 수행하였는데, 보행자는 전략단계인 목적지에 빨리 도착하기 위해, 전술단계인 횡단보도를 건너기 위해 실행단계에 해당하는 보행이동행태에서 보행속도를 높인다. 즉 전략, 전

술, 실행단계는 상호연관성을 가지고 있다.

또한 실행단계 보행행태의 영향범위를 산정하기 위해, Kitazawa and Fujiyama (2009)는 실험조사를 통해 보행자의 시야 및 시선 패턴을 살펴보고, 보행자가 다음 위치를 선택할 때 잠재적인 장애물을 고려하는 공간적 범위를 인간의 정보처리영역(information process space, IPS)이라 정의하고, 이를 조사하기 위해 머리부착형 시선 추적(eye tracker) 장치를 이용하여 IPS의 모양, 크기를 측정하였다. 시선 추적 결과 보행자는 장애물보다 잠재적인 위험성에 즉각적으로 대응하기 위해 보도표면에 더 시선을 고정하는 것으로 나타났으며, IPS의 형태는 부채꼴로 조사되었다. 또한 움직이는 장애물(다른 보행자 등)에 비해 고정 장애물에 시선을 향하는 것으로 관찰되었다.

## 2) 보행자 분석단위에 따른 분류

보행행태모형에서 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다.

### ① 거시적 관점

거시적 관점의 연구는 보행자의 움직임을 하나의 동질적이고 연속된 흐름으로 접근하며, 연구의 주요 목적은 보행자, 보행시설의 공간배치에 대한 것이다. 교통량(보행량)-밀도-속도 관계식을 기반으로 공간의 서비스수준(level of service, LOS)을 분석하는 연구가 대부분이며, Fruin (1971)을 시작으로 관련 연구가 활발히 진행되었다. 거시적 관점의 접근 방식은 모형의 단순성, 적용의 용이성 등의 이유로 널리 사용되고 있다.

Fruin (1971)은 뉴욕과 펜실베이니아 터미널에서 보행량 조사를 통해, 보행교통류(보행량, 속도, 밀도) 관계식을 도출하고 보행공간의 1인당 보행점유공간, 보행교통류율 등의 지표를 통해 공간의 서비스수준을 분석

하였다. 이는 거의 초기적 보행행태 연구이며, Fruin의 보행량-밀도-속도 관계는 이후 연구에서 다양하게 적용되어 왔다. 국내 도로용량편람(국토교통부, 2013)과 미국 도로용량편람(USHCM) 역시, 보행교통류 관계식에 기반하여 작성되었다. 도로용량편람의 보행자시설 분석은 보행밀도, 보행점유면적, 보행교통류율 등 정량적인 지표를 바탕으로 보행공간의 서비스수준을 산정하며, 보행공간은 보행자도로, 계단, 대기공간, 신호횡단보도로 구분된다. 보행교통류 거시적 특성을 통해 보행공간의 서비스수준을 도출하고자 하는 연구는 활발하게 진행되어 왔다(김건영 외, 2002; 김정현 외, 2002; Hughes, 2002; 임진경 외, 2004; Huang et al., 2009).

**<표 2-4> 보행자도로 서비스수준**

서비스수준	보행교통류율 (인/분/m)	점유공간 (m <sup>2</sup> /인)	밀도 (인/m <sup>2</sup> )	속도 (m/분)
A	≤20	≥3.3	≤0.3	≥75
B	≤32	≥2.0	≤0.5	≥72
C	≤46	≥1.4	≤0.7	≥69
D	≤70	≥0.9	≤1.1	≥62
E	≤106	≥0.38	≤2.6	≥40
F	-	<0.38	>2.6	<40

자료: 국토교통부(2013).

이신해(2012)는 도로용량편람의 방법론을 통해 서울시 전역을 대상으로 보도의 보행 서비스수준을 분석하였다. 도로용량편람의 서비스수준이 지나치게 양호한 결과가 나타나기 때문에, 해당 연구에서는 보다 현실적인 분석을 위해 보행량과 물리적 환경요소를 대표하는 유효보도폭의 절대값을 이용하여 보도의 서비스수준을 산정하였다. 최근 보행량, 속도, 밀도 등 정량적 요소 뿐 아니라, 보행공간의 쾌적성, 안전성, 편리성 등

정성적 요인을 반영한 보행공간 서비스수준 분석방법론 등이 제안되고 있다(김태호 외, 2009).

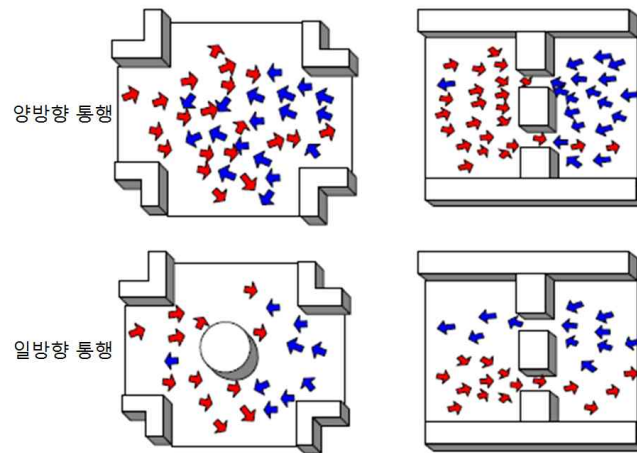
거시적 관점의 보행교통류 연구는 모형이 단순하고 적용이 편리하여 광범위하게 사용되고 있으나, 특정현상을 반영하기 힘들다는 단점이 존재하며, 각종 보행시설의 설치 여부 등 미세한 분석이 요구되는 경우 그 한계를 드러낸다. 보행량 또는 속도-밀도 관계식 등을 통해 보행공간을 평가한 연구는 보행자 간, 보행자와 보행시설, 건물 등 각종 보행에 영향을 미치는 요소들 간의 상호작용을 반영하지 못하며 보행량을 기준으로 보행공간을 평가하기 때문에 여러 가지 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)의 효율성을 측정하기 어렵다. 즉 보행에 영향을 미치는 요소의 변화가 보행공간의 서비스수준으로 완전히 설명되지 않는 문제가 존재한다. 또한 보행교통류는 차량과 달리 여러 방향의 움직임이 존재하기 때문에, 이를 하나의 관계식으로 표현하기에는 한계가 있다(Lam et al., 1995; Daamen and Hoogendoorn, 2003).

## ② 미시적 관점

거시적 관점 연구의 한계를 보완하기 위해 미시적인 관점에서의 보행행태 연구가 활발히 진행되고 있다. 미시적 관점의 연구는 개별보행자 단위의 보행행태 연구를 의미한다. 즉, 보행자를 독립적인 객체로 보며, 이러한 모형의 가장 중요한 특성은 보행자 간의 상호작용을 반영한다는 점이다(Helbing and Molnar, 1995; Werner and Helbing, 2003; Seyfried et al., 2006). 보행자를 기체(gas), 유체(fluid) 등 입자에 비유한 연구가 미시적 관점의 보행행태 초기 연구이다(Henderson, 1974; Helbing, 1992).

Helbing and Molnar (1998)은 동일한 크기의 보행공간에서 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)의 차이에 따라 실질적인 서비스수준은 차이가 나는데 거시적 관점의 연구에서는 이를 반영하지 못하는 단점을 제시하고 미시적 모형 즉, 개별행태 모형의 중요성을 강조하고 있다(<그림

2-10> 참조).



자료: Teknomo(2006).

<그림 2-10> 보행공간 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)

미시적 관점의 보행행태 연구는 보행공간의 속성(spatial representation)에 따라 이산형(discrete) 보행공간과 연속형(continuous) 보행공간으로 구분 가능하다. 이산형 보행공간은 분석대상공간을 셀(cell) 등의 이산적인 공간으로 표현하여 분석하는 것을 의미하며, 이러한 모형의 대부분은 사건 기반 시뮬레이션(event based simulation)기법을 이용한다. 대표적인 예는 CA(cellular automata)<sup>6)</sup>로, CA는 생물학 분야에서 개발되어 여러 분야에 적용되고 있으며, 일반적으로 인접한 격자형 셀 간의 상호작용을 규칙화한 모형을 뜻한다. 여기서, CA는 상태(state), 주변(neighborhood), 규칙(rule)의 3가지 구성요소를 갖는데, ‘상태’는 각 셀의 공간적 점유상태를 나타낸 값으로, CA모델에서는 이 값이

6) CA: 1940년 두 명의 수학자 Ulam와 Neumann이 고안해낸 이론으로, CA이론은 격자형으로 생긴 인접한 셀 간의 상호작용을 규칙화하여 프로그래밍한 셀들의 배열조합을 말하는 것으로 전체적으로도 셀 한 개와 같은 격자형 구조를 갖는다.

가장 간단한 숫자 0, 1로 표현된다. CA이론은 메모리 사용량이 적고 연산이 빨라 대규모 네트워크 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. ‘주변’은 서로에게 영향을 미치는 각 셀들의 집합수를 나타내는 것으로, 셀에 영향을 미치는 다른 셀들의 집합이라고 설명된다. ‘규칙’은 전체적 격자형 구조에서 각 셀들의 이동을 결정짓는 규칙을 말하는 것으로 셀의 이동방향과 거리가 규칙에 의해서 결정된다(이신해·이승재, 2009).

CA를 이용하여 보행행태를 구현한 초기 연구는 Gipps and Marksjo (1985)이며, CA는 보행자를 개별 단위로 고려하며 계산과정이 단순하여 보행행태모형에 널리 활용되고 있다(Galea and Galparsoro, 1994; Lovas, 1994; Blue and Adler, 1998; Batty and Jiang, 1999; Blue and Adler, 2001; Burstedde et al., 2001; Weifeng et al., 2003; Kirchner et al., 2004; Kitazawa and Batty, 2004).

Gipps and Marksjo (1985)는 분석대상지역을 셀로 구분하여 보행자가 한 사람씩 점유하도록 하고 주변 9개 셀에 대한 점수를 계산하여 가장 높은 편익이 생기는 셀로 이동하는 규칙을 생성하였다. 주변 보행자에 근접할수록 반발정도는 높아지고, 보행자가 목적지에 가까워질수록 편익이 커지는 규칙을 생성하여 보행자 움직임을 구현하였다. Blue and Adler (1998, 2001) 역시 보행자의 이동과정을 총 4단계(진로 결정, 결정된 진로로 이동, 통행속도 배정, 속도 갱신)로 구분하여 CA기반 양방향 보행자 행태를 모형화하였다. 국내에서도 CA 기반으로 보행자의 움직임을 구현한 연구는 다수 존재한다(손영태 외, 2004; 이신해·이승재, 2009; 곽수영 외, 2012). Antonini et al. (2006)는 보행자가 이동가능한 대안을 셀 단위가 아닌 속도, 방향에 따른 33개 이산적인 공간으로 표현하여 보행행태를 모사하였다. 속도는 유지, 감속, 가속 3가지로 구분되며, 각도는 시야를 기준으로 11개의 공간으로 구성된다. 33개 이산적 공간이 보행자의 다음 시간대(time step)의 이동이 이루어지는 대안으로 보고, 각 대안의 속성인 방향, 거리, 점유여부 등을 고려하여 로짓모형을 통해 대안 즉 보행공간을 선택한다.

CA 등과 같은 이산형 보행공간 모형은 적용 용이성 등의 장점으로 인



해 개별보행자 단위 보행행태모형으로 널리 이용되고 있으나, 차량과 달리 정해진 경로가 없고, 다양한 방향으로의 움직임(multi-direction movement)이 가능한 보행자의 특성을 세밀하게 반영하지 못한다는 단점이 존재한다. 이에 보행자의 움직임을 보다 현실적으로 반영하기 위하여 SLM(square lattice model), HLM(hexagonal lattice model), RHLM(rotated hexagonal lattice model) 등의 모형도 개발되었다(Muramatsu et al., 1999; Manniccam, 2002; 이준 외, 2009). SLM은 정사각형 셀 대신 정방격자를 활용하여 보행자 움직임을 표현하고자 하였고, 방향의 다양성을 고려하기 위하여 HLM을 통해 대각방향의 움직임을 구현하였다. RHLM는 HLM의 단점은 보완하고 보행자의 움직임을 보다 현실적으로 반영하기 위해 제안되었다(이준 외, 2009).

반면, 연속형 보행공간 모형은 이산형 보행공간 모형의 단점을 보완한 것으로, 연속적인 시·공간을 대상으로 한다. Okasaki (1979)의 Magnetic Force Model과 Helbing and Molnar (1995)의 Social Force Model이 대표적이다. Magnetic Force Model은 보행자와 목적지에 양극과 음극이 존재한다고 가정하고 자석간의 거리에 따른 자기력 관계를 통해 보행자의 움직임을 표현하였다. 보행자와 장애물은 각각 양극을 가지고 충돌을 피하며, 보행자와 목적지는 음극을 가져 목적지를 향해 진행하도록 되어 있다. Social Force Model은 Vissim 등 교통분야 상용패키지에 광범위하게 이용되고 있는 모형으로, 보행자의 인력(attractive force)과 척력(repulsive force)을 수학적으로 표현하였다. 즉, 목적지로 향하는 힘, 장애물 또는 다른 보행자 등에서 멀어지려는 힘 등 보행자에게 미치는 Social Force를 고려하여 보행자의 속도와 방향을 설정하게 된다. 이는 연속적인 모형으로 보행흐름분리(lane formation)<sup>7)</sup>, 자기조직화(self organization)<sup>8)</sup>등의 보행행태 현상을 반영한다. 그러나 Social Force

---

7) 보행공간에서 보행밀도가 어느 수준 이상이 되면 물리적인 경계나 통행방법 등 외부 규칙 없이도 서로 반대 방향끼리 피하고 같은 방향끼리 합쳐지면서 보행방향의 흐름이 자연스럽게 분리되는 현상, 즉, 같은 방향으로 보행하는 군집끼리 열을 이루는 현상을 의미한다.

8) 보행자 개인의 선택과 행동이 모여 일정한 패턴과 질서를 이루는 경향을 의

Model은 보행자의 복잡한 행동규칙, 다양성 등을 반영하기 어려우며, 또한 근시안적인(myopic) 기법으로 보행자의 시각적인 능력을 고려하고 있지 않다는 문제점이 제기되고 있다(Nasir et al., 2014).

이와 함께, 실측자료를 통해 보행자의 보행이동행태를 검증한 연구도 있다. Teknomo (2002, 2006)는 보행이동행태모형인 Microscopic Pedestrian Simulation Model(MPSM)을 개발하고 미시적 보행자 시뮬레이터 Micro-Pedsim를 통해 현장자료와의 검증을 수행하였다. 기존 Magnetic Force Model, Social Force Model 등은 실측자료를 통한 검증이 부족한 문제점이 존재하였는데, Teknomo (2002, 2006)는 이를 해결하고자 노력하였다.

### 3) 기타

최근 안전이 강조됨에 따라 화재, 재난 등 긴급상황의 보행행태에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Zheng et al., 2009). 긴급상황시 보행행태는 일반상황에서의 보행과 다른 양상을 보이는 것으로 알려져 있으나, 긴급상황에 대한 실질적 보행자 행태는 쉽게 실험이 어렵고 자료도 충분하지 않다(이준, 2013). 일반적으로 긴급상황시 보행행태는 행태에 영향을 미치는 심리적·본능적·사회적 요인에 대한 이해가 우선시 되어야 하며(Pan, 2006; 이준, 2013) 이러한 요인은 크게 공간의 익숙함, 의사결정유형, 출구 안내, 개인의 스트레스 한계정도, 군집 특성 등으로 구분가능하다(Pan, 2006).

국내에서 긴급상황 시 보행행태와 관련된 연구는 초기 단계로, 이준(2013)은 인간의 보행을 ‘본능적 보행(instinctual walking)’과 ‘지적 보행(intellectual walking)’으로 구분하고 평상시의 보행행태와 패닉상태의 피난행태를 구분하였다. 또한 총 대피시간을 최소화하는 대피모형 개발, 최적 피난 해석 시뮬레이션 중 하나인 EXODUS를 이용하여 실내보행공간

---

미한다. 병목구간이나 출입구에서 빠져나가지 못한 보행자들이 아치형의 군집(archformation)을 형성하는 행태가 대표적이다.

의 경로선택 행태 등의 연구가 있다(윤성환 외, 2009;곽수영 외, 2012). 긴급상황 시 보행행태 연구는 일반 보행공간 외 선박 등 다양한 공간에서도 적용되고 있다(하술 외; 2013).

#### 4) 보행행태 연구의 요약

보행행태와 관련된 연구는 보행자 분석단위와 보행행태 선택과정에 따라 분류된다. <표 2-5>에서는 보행연구 분류에 따른 선행연구를 정리하였다. 본 연구는 개별보행자 단위의 보행이동행태를 모형화하는데 목적이 있으므로 보행자 분석단위 중 미시적 관점과 보행행태 선택과정 중 실행단계에 해당한다.

<표 2-5> 보행자 움직임 관련 선행연구 분류

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점		전략	전술	실행
			공간 <sup>1)</sup>			
Antonini et al. (2006)		○	D			○
Asano et al. (2009)						○*
Asano et al. (2010)					○*	○*
Batty and Jiang (1999)		○	D			○
Blue and Adler (1998)		○	D			○
Blue and Adler (2001)		○	D			○
Boarnet and Crane (2001)				○		
Borgers and Timmermans (1986)				○*	○	
Bovy and Stern (1990)					○	
Burstedde et al. (2001)		○				○
Cheung and Lam (1998)					○*	
Fruin (1971)	○					
Galea and Galparsoro (1994)		○	D			○
Gim and Ko (출간예정)					○	

<표 2-5> 계속

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점	공간 <sup>1)</sup>	전략	전술	실행
Gipps and Marksjo (1985)		○	D			○
Guo (2009)					○	
Guo and Loo (2013)					○	
Helbing (1992)		○	C			○
Helbing and Molnar (1995)		○	C			○
Helbing and Molnar (1998)		○	C			○
Henderson (1974)		○				○
Hill (1982)					○	
Hoogendoorn (2001)		○				○*
Hoogendoorn and Bovy (2004)		○			○*	
Huang et al. (2009)	○					
Hughes (2002)	○					
Ishaque and Noland (2008)		○				○*
Kirchner et al. (2004)		○				○
Kitazawa and Fujiyama (2009)						○
Kitazawa and Batty (2004)		○	D		○	○
Li and Tsukagichi (2005)					○	
Lovas (1994)		○	D			○
Manniccam (2002)		○	D			○
Marchand (1974)					○	
Muramatsu et al. (1999)		○	D			○
Nasir et al. (2014)		○	C			○
Okasaki (1979)		○	C			○
Robin et al. (2009)						○*
Seneviratne and Morrall (1985)					○	
Teknomo (2002)		○	C			○
Teknomo (2006)		○	C			○
Timmermans et al. (1992)				○*		
Verlander and Heydecker (1997)					○	
Weifeng et al. (2003)		○	D			○

<표 2-5> 계속

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점	공간 <sup>1)</sup>	전략	전술	실행
Zhu and Timmermans (2005)				○*		
곽수영 외 (2012)		○	D			○
국토교통부 (2013)	○					
김건영 외 (2002)	○					
김정현 외 (2002)	○					
김태호 외 (2009)	○					
손영태 외 (2004)		○	D			○
안은희 외 (2004)					○	
윤상원·배상훈 (2007)					○	
윤성환 외 (2009)					○	
이신해 (2012)	○					
이신해·이승재 (2009)		○	D			○
이인성·김현옥 (1998)					○	
이준 외 (2009)		○	D			○
임진경 외 (2004)	○					
하슬 외 (2013)		○	C			○

주: 1) 미시적 관점의 보행행태 연구 중 보행공간 속성이 이산적인 경우 D(discrete), 연속적인 경우 C(continuous)로 표시하였다.

2) \*는 보행자의 의사결정과정을 구체적으로 제시한 연구를 나타낸다.

## 5) 실행단계 보행행태모형

### ① Social Force Model

Helbing and Molnar (1995)은 우연하고 무질서하게만 보이는 보행자들의 움직임에서 나름의 일관성, 합리성, 보편성을 발견하고 Social Force Model을 개발하였다. Social Force Model에서 Social Force는 보행자와 주변의 다른 보행자, 또는 물리적, 환경적 요인들 사이에서 나타나는 상호작용을 의미한다. 방향과 속력을 유지하려는 힘과 다른 보행자나 물체로부터 멀어지거나 더 가까이 다가가려는 힘이 동시에 작용하며, 이러한 Social Force가 보행자의 속도를 결정한다. Social Force는 크게 목적지로 향하는 힘(driving force)과 장애물 또는 다른 보행자로부터 적정거리를 유지하려고 하는 척력, 반대로 가족, 친구 등 동반자, 상점 등의 매력요인으로 인한 인력의 합으로 구성된다.

먼저, 목적지로 향하는 힘은 [식 2-2]와 같이 표현된다.

$$\vec{f}_\alpha^o = \frac{1}{\tau_\alpha}(v_\alpha^o \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad [\text{식 2-2}]$$

여기서,  $\vec{f}_\alpha^o$ 는 보행자  $\alpha$ 의 목적지로 향하는 힘,  $\tau_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 반응시간,  $v_\alpha^o$ 는 보행자  $\alpha$ 의 희망속력(스칼라),  $\vec{e}_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 희망방향,  $\vec{v}_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 현재속도를 의미한다.

멀어지고자 하는 반발력인 척력은 [식 2-3]과 같다.

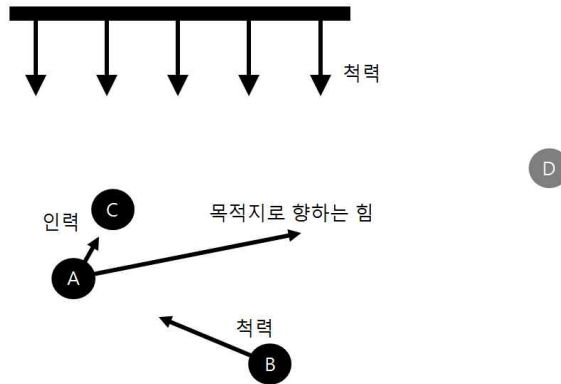
$$\vec{f}_{\alpha\beta} = A_\alpha \exp\left[\frac{r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}}{B_\alpha}\right] \vec{n}_{\alpha\beta} \cdot F_{\alpha\beta} \quad [\text{식 2-3}]$$

여기서,  $\vec{f}_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 가 다른 보행자  $\beta$ 로부터 받는 힘,  $A_\alpha$ 와  $B_\alpha$ 는 파라미터를 나타낸다. 또한  $r_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 의 신체타원 반지름의 합,  $d_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 의 중심점간 거리,  $\vec{n}_{\alpha\beta}$ 는 다른 보행자  $\beta$ 로부터 보행자  $\alpha$  방향의 표준 벡터,  $F_{\alpha\beta}$ 는 보행자의 이방성<sup>9)</sup>을 고려한 변수(0~1사이의 값)이다.

동반자 등 매력요인으로 다가가고자 하는 인력은 [식 2-4]이다.

$$\vec{f}_{\alpha\beta}^{ATT} = -C_{\alpha\beta} \vec{n}_{\alpha\beta} \quad [\text{식 2-4}]$$

여기서,  $C_{\alpha\beta}$ 는 파라미터,  $\vec{n}_{\alpha\beta}$ 는 타 보행자  $\beta$ 로부터 보행자  $\alpha$  방향의 표준 벡터를 의미한다.



주: A는 보행자, B는 다른 보행자, C는 동반자, D는 목적지를 나타낸다.

<그림 2-11> Social Force Model에서 Social Force의 상호작용

9) 이방성(anisotropy)은 물체의 물리적 성질이 방향에 따라 다른 것을 의미한다.

목적지로 향하는 힘, 인력, 척력의 합으로 구성되는 Social Force ( $\vec{f}_\alpha$ : 보행자  $\alpha$ 의 Social Force)는 [식 2-5]와 같이 표현된다.

$$\vec{f}_\alpha = \vec{f}_\alpha^o + \sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta} + \sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta}^{ATT} \quad [\text{식 2-5}]$$

## ② Magnetic Force Model

Okazaki와 Matsushita는 자기력을 이용한 Magnetic Force Model을 개발하였다(Okazaki, 1979; Okazaki and Matsushita, 1981; Matsushita and Okazaki, 1991; Okazaki and Matsushita, 1993). Magnetic Force Model은 보행자와 주변시설을 자기장 내의 자성체로 적용한 모형으로, 보행자, 장애물 및 다른 보행자를 양극으로 보고 도착지를 음극으로 여겨서 이에 따라 발생하는 인력과 척력으로 보행자의 이동을 구현하였다. 자기력은 [식 2-6]과 같이 정의된다.

$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{s^3} \cdot \vec{s} \quad [\text{식 2-6}]$$

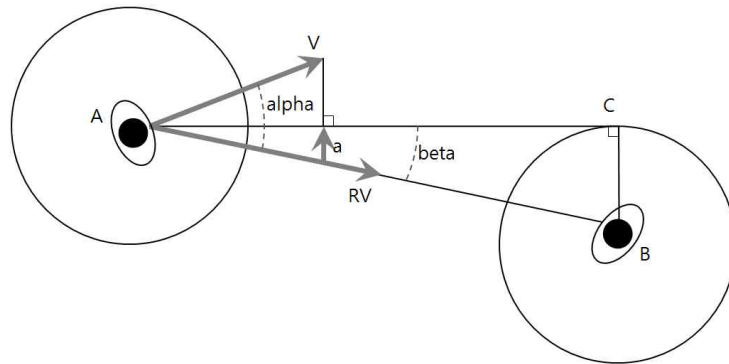
여기서,  $\vec{F}$ 는 보행자에게 작용하는 자기력,  $k$ 는 파라미터를 나타낸다. 또한  $Q_1$ 는 기준보행자의 자극강도(intensity of magnetic pole),  $Q_2$ 는 기준보행자 외 자성체의 자극강도,  $\vec{s}$ 는 기준보행자에서 자성체로 향하는 벡터,  $s$ 는 기준보행자와 자성체간 거리이다.

또한 보행자가 다른 보행자 또는 장애물과의 충돌을 피하기 위한 감속도  $a$ 는 [식 2-7]과 같다.

$$a = \tan \beta \cdot \cos \alpha \cdot v_A \quad [\text{식 2-7}]$$



여기서,  $\alpha$ 는 상대속도(RV, 보행자 A에 대한 B의 상대속도)와 보행자 A의 속도간 각도,  $\beta$ 는 상대속도(RV, 보행자 A에 대한 B의 상대속도)와 A보행자와 B보행자 영역의 접선(AC)간 각도,  $v_A$ 는 보행자 A의 속도이다(<그림 2-12> 참조).



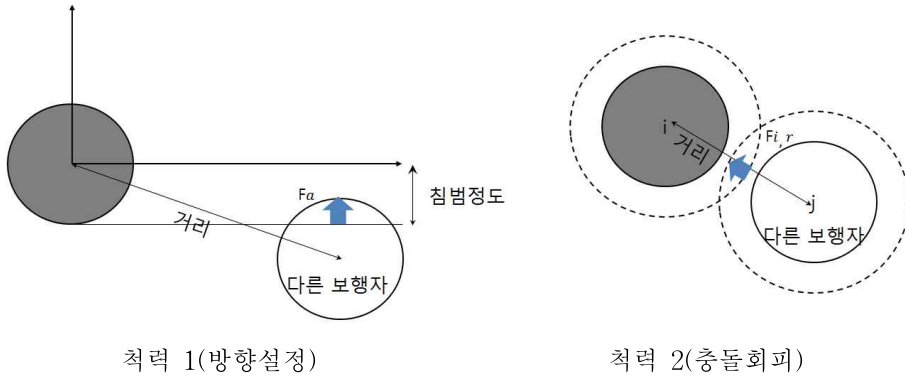
자료: Okazaki and Matsushita(1993).

<그림 2-12> Magnetic Force Model의 감·가속도

### ③ Microscopic Pedestrian Simulation Model

Teknomo (2002, 2006)는 Microscopic Pedestrian Simulation Model (MSPM)을 개발하였다. MSPM은 Magnetic Force Model, Social Force Model 등 기존 모형들이 검증이 부족하다는 단점을 극복하고자 노력하였으며, 실제 횡단보도에서 수집된 보행자 자료를 모형의 결과와 비교하였다. 즉, MSPM의 가장 큰 장점은 실제 자료를 기반으로 모형을 개발하였다는 점이라 볼 수 있다. MSPM에서 보행자는 원으로 표현되며, 각각의 보행자는 기중점을 가지고 있다. 보행자는 2가지 종류의 힘으로부터 영향을 받는데, 앞으로 나아가고자 하는 힘(forward force)과 주변 보행자로부터 멀어지고자 하는 힘인 척력이다. Teknomo (2002, 2006)는

횡단보도 내 보행자들의 움직임을 조사하여 시간대별로 보행자의 속도와 밀도 등을 분석하였으며, 시뮬레이션 결과 값과의 비교를 통해 프로그램의 신뢰성을 설명하였다.



자료: Teknomo(2002).

### <그림 2-13> MSPM의 척력

앞으로 나아가고자 하는 힘은 다른 보행자의 방해가 없을 경우, 즉 다른 보행자와의 상호작용이 발생하지 않을 때, 보행자가 현재 위치에서 목표 위치로 향하는 힘  $g(t)$ 과 속도  $\hat{v}_f(t)$ 를 의미한다. 여기서  $\hat{v}_f(t)$ 는 0과 보행자의 최대속도( $\mu_{\max}$ ) 사이의 값이다. 목적지로 가고자하는 힘  $g(t)$ 과 속도  $\hat{v}_f(t)$ 는 [식 2-8], [식 2-9]로 표현된다.

$$g(t) = \frac{e(t) - p(t)}{\|e(t) - p(t)\|} \quad [\text{식 2-8}]$$

$$\hat{v}_f(t) = \frac{\mu_{\max}}{\alpha} \frac{(e(t) - p(t))}{\|e(t) - p(t)\|} \quad [\text{식 2-9}]$$

여기서,  $\alpha$ 는 파라미터,  $e(t)$ 는 목적지 위치,  $p(t)$ 는 현재 위치이다.

또한 보행자의 진행방향에 다른 보행자가 존재하면 멀어지고자 하는 척력이 발생한다. MSPM에서는 두 가지 척력을 고려하고 있다. 첫째는 방향설정과 관련되며, 보행자의 진행방향에 다른 보행자가 위치할 경우 가장 가까운 다른 보행자를 대상으로 산정되는 척력으로, 척력을 고려한 속도  $\hat{v}_a^i(t)$ 는 [식 2-10]과 같이 표현된다. 두 번째는 보행자 주변의 모든 보행자를 대상으로 계산되며 충돌을 회피하기 위한 척력을 의미한다. 이를 고려한 속도  $\hat{v}_{i,r}(t)$ 는 [식 2-11]이다.

$$\hat{v}_a^i(t) = \frac{\mu_{\max}}{\chi} \frac{(2r - y(t))}{\|p_k(t) - p_i(t)\|} \quad [\text{식 2-10}]$$

$$\hat{v}_{i,r}(t) = \frac{\mu_{\max}}{\beta} \sum_j \frac{(2r - d_{ij}(t))(p_i(t) - p_j(t))}{d_{ij}(t)} \quad [\text{식 2-11}]$$

여기서,  $\beta$ 와  $\chi$ 는 파라미터,  $p_k(t)$ 는  $k$  보행자의 현재 위치,  $p_i(t)$ 는  $i$  보행자의 현재 위치,  $\|p_k(t) - p_i(t)\|$ 는 보행자  $i, k$  간 거리,  $r$ 는 보행자의 신체타원 반지름,  $y$ 는 다른 보행자의 침범 정도이다.

### 3. 보행공간 연구

보행공간을 분석하는 기법 중 가장 대표적으로 활용되는 것은 공간구문론(space syntax)<sup>10)</sup>이다. 공간구문론은 분석대상을 네트워크로 구현하여 공간적 특성을 분석하며, 건물, 오픈스페이스, 가로망 등의 위계와 특

---

10) 공간구문론은 영국 런던 대학(University College London)의 Hillier 교수와 Hanson 교수가 개발한 공간분석 이론으로 건축물 및 도시의 공간구조 분석을 객관적으로 해석하는 틀을 제공한다.

성을 분석하는데 주로 활용된다. 각 공간의 접근성을 산출함에 있어 전체 공간구조에서 특정 공간의 위계를 기반으로 하며, 공간깊이(depth)<sup>11)</sup>가 가장 기본적인 개념이다. 또한 공간분석을 위해 연결도와 통합도 개념에 대한 이해가 필요한데, 연결도(connectivity)는 한 축선에서 연결되는 모든 축선을 의미하며, 통합도(integration)는 특정 한 노드에서 다른 노드로 가기 위한 축선의 개수를 의미하는 공간깊이를 이용하여 산정한다. 즉, 통합도는 링크의 접근성을 나타내는 척도로, 전체통합도(global integration), 국부통합도(local integration) 등 지표<sup>12)</sup>를 통해 공간구조의 속성을 정량화한다(김영옥, 2003).

공간구문론을 활용하여 보행공간의 속성을 분석하고 보행량과의 상관관계를 추정하여 보행공간 특성 및 공간사용패턴 등을 정의할 수 있다. 일반적으로 보행공간의 접근성을 기반으로 보행공간의 통합도를 측정하고, 보행공간의 통합도와 보행량은 양의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 또한 토지이용특성에 따라 보행량과 공간과의 관계는 다양하게 나타나고 있다(김영옥, 2003; 김영옥·신행우, 2004; 김영옥·신행우, 2007; 김기현 외, 2014). 보행의 경우, 차량과 달리 공간구조의 전체통합도 보다 국부통합도에 밀접한 관련성이 존재하는 것으로 분석되었다(김영옥, 2003).<sup>13)</sup> 또한 가시접근성 등 인간의 시지각적 특성을 반영하여 보행공간의 구조를 살펴본 연구도 있다(정혜선·김영옥, 2012). 교통부문에서 공간구문론을 활용한 연구는 김찬주·김영옥(2007)로, 지하철 역사내 공간구조를 VGA(visibility graph analysis)<sup>14)</sup>를 이용하여 분석하고 공간특성과 보행량을 비교·분석하여 지하철 역사의 공간계획과 사용패턴의 관계를 살펴보았다. 분석결과, 지하철 역사내에서 승강장이 가장 낮은 통합도

11) 공간형태 개념에서의 거리를 의미하며 물리적 거리의 개념과 다르다.

12) 전체통합도는 분석대상 범위내의 축선도에 표현된 모든 공간을 기·종점으로 가정하였을 때, 계산한 통합도이며, 국부통합도는 공간구조 속성을 인접한 공간 범위내만 고려하여 산출한다.

13) 차량은 보행에 비하여 통행거리가 길고 광역적 행태를 보이므로, 전체통합도와 더 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다.

14) VGA는 공간구문론 기법 중 특히 가시접근성을 기본으로 공간을 정량화하는 기법을 의미한다.

를 가지는 것으로 나타났으며, 역사 설계시 타 공간에 비하여 승강장 부분에 대한 가시접근성을 확보해야 하는 개선사항을 도출할 수 있다. 또한 기존 공간구문론 방법을 이용하여 보행량을 예측할 경우 교통 부문의 네트워크 구성방법과 상이하여 활용에 어려움이 있기 때문에, Dial 알고리즘을 활용하여 링크의 상대적 중요도를 나타내는 연결도 개념을 도입하고 보행량을 예측하였다(한상진 외, 2008). 공간구문론은 보행공간 구조를 정량화하고 분석이 가능한 장점을 가지고 있으므로, 이를 통한 공간의 통합도는 경로선택행태와 밀접한 연관이 있을 수 있다.

#### 4. 선행연구의 시사점

지속가능한 녹색교통 중심체계, 비동력 교통수단으로 패러다임이 변화함에 따라 보행에 대한 재조명이 요구되고 있다. 보행활성화와 보행환경 개선을 위한 정책방안, 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 본 연구는 보행공간 계획 및 운영 방안의 평가를 위한 보행공간 평가 틀의 핵심이 되는 보행행태모형 개발을 목적으로 한다. 따라서 보행행태에 초점을 맞추어 관련 선행연구를 검토하였다.

보행행태 연구는 거시적 관점의 보행교통류 접근방식에서 시작되어 최근에는 개별보행자 단위의 미시적 연구가 활성화되고 있다. 거시적 관점의 연구는 단순한 모형구조와 적용 편리성으로 널리 활용되었으나, 보행자의 상호작용을 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 이에 개별보행자 단위의 미시적 관점 연구가 주목받고 있다. 미시적 관점의 연구 중 보행공간을 이산적(셀 등)으로 보는 연구는 보행자의 다방향 움직임 행태를 세밀하게 반영하지 못하는 단점이 존재한다. 또한 Social Force Model 등 개별행태를 고려하는 대부분의 연구는 주변 요소들의 상호관계(목적지로 향하는 힘, 장애물을 회피하는 힘 등)만을 집중하고 있어, 보행행태가 인간의 의사결정과정이라는 사실을 간과하고 있는 경우가 많다. 즉 이러한 모형은 보행자의 의사결정과정이 반영되지 않고, 확률적 행태가 고려되지 않은 결정적 모형이라는 한계를 가지고 있다.

최근 보행자의 자율성을 강조한 모형이 주목받고 있다. 복잡계를 구현하기 위한 행위자 기반 모형에서 지적 행위자는 객체에 자기 통제 및 자율적 상호능력을 갖춘 것을 의미하며, 의사결정을 수행할 수 있다. 보행행태 의사결정과정은 다양한 인적요인이 반영된 복합적 과정으로 이를 수학적 모형으로 구축하는 것은 쉽지 않다. 또한 보행자의 개별특성에 따라 다양하고 주관성, 애매함 등 불확실성 요소가 포함되고 보행공간의 속성, 주변 여건, 사회적·심리적 요소 등이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 행태 매커니즘을 정의하는 것은 매우 어렵다.

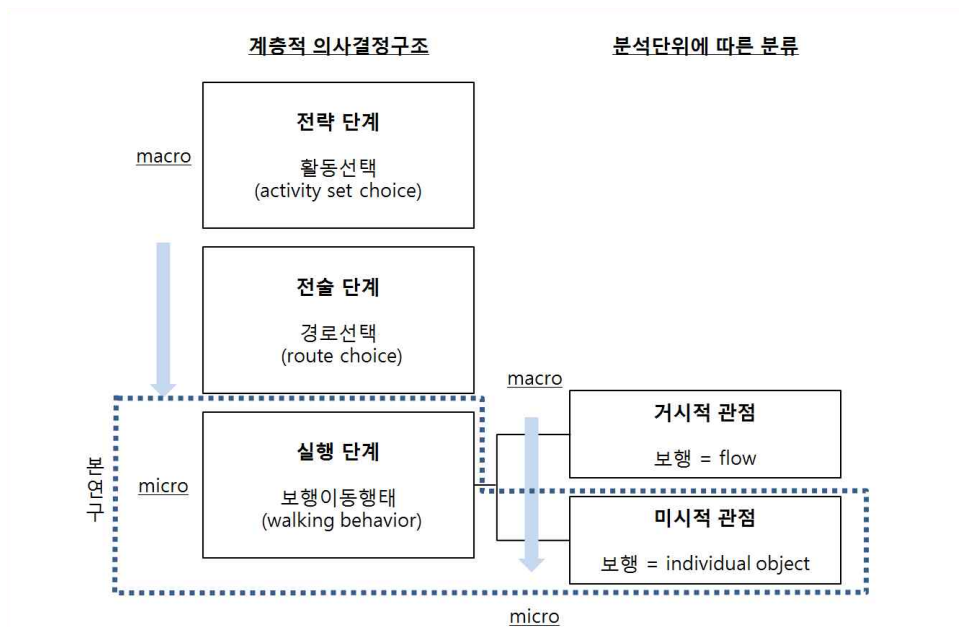
이러한 어려움에도 불구하고 보행환경 개선, 보행공간 평가를 위해서는 실제 현상을 보다 정확히 반영한 보행행태모형이 구축되어야 하며, 보행자의 복잡한 의사결정과정을 반영하여야 할 것이다. 의사결정과정의 불확실성, 주관성을 정량화하기 위한 방안이 필요하며, 이와 더불어 개발된 모형의 검증 및 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 보행자 간 상호작용을 고려하고 의사결정과정을 수행하는 개별보행자 단위의 미시적 보행이동행태모형을 구축하고자 한다. 여기서 ‘미시적’은 첫째, 개별보행자 분석단위의 모형이라는 점과 둘째, 보행행태의 전략, 전술, 실행단계 중 하위 개념인 실행단계의 모형이라는 것을 의미한다. 보행자는 보행행태의 기초이자 핵심인 보행이동행태모형을 통해 공간 내에서 움직이고 다양한 활동을 수행하므로 보행이동행태는 매우 정교하고 현실을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 여기서 보행자는 자율성을 가지며 주도적으로 행위를 하는 객체로, 개인의 판단기준에 따라 의사결정을 수행한다. 복잡한 의사결정과정을 정량화하는데 장점을 가지고 있는 퍼지추론을 적용하여 보다 인간의 사고에 근접한 모형을 만들고자 한다. 또한 보다 현실적인 모형을 구축하기 위하여 다양한 자료를 수집하고 모형에 적용하고자 한다. 보행이동행태모형은 보행행태의 가장 하위 개념으로 보행자 시뮬레이터에서 구현되어, 핵심 기능을 수행하도록 개발한다. 또한 보행자 시뮬레이터의 타 모듈과 연계되어 다양한 효과척도(Measure Of Effectiveness, MOE) 산출을 통해 보행공간의 계획 및 운영 평가 등에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 제 3 장 보행이동행태모형 개발

### 제 1 절 보행이동행태 정의

모형개발에 앞서 보행이동행태를 정의하고자 한다. 본 연구에서 보행이동행태는 개인의 의사결정을 토대로 이루어지며, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 의미한다. 보행이동행태는 계층적 의사결정 구조 중 실행단계에 해당하며, 실행단계는 보행자와 미시적 환경조건과의 상호작용을 나타내는 단계로 보행행태모형의 기초가 되는 핵심 모형이다.

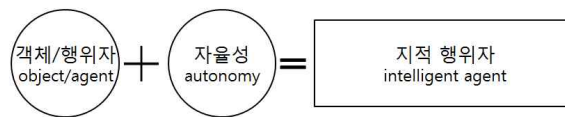


<그림 3-1> 보행이동행태의 위계

본 연구의 보행이동행태는 다음과 같은 5가지 특성을 가지고 있다.

첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현한다. 보행자를 하나의 객체로 보고 개별특성을 고려하여 보행이동행태모형을 구축한다.

둘째, 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 지적 행위자는 자기통제, 자율적 상호작용 능력을 가진 객체를 의미한다. 즉, 본 연구의 보행자는 자율성을 갖고 있으며 개인의 판단기준에 따라 의사결정을 수행한다.



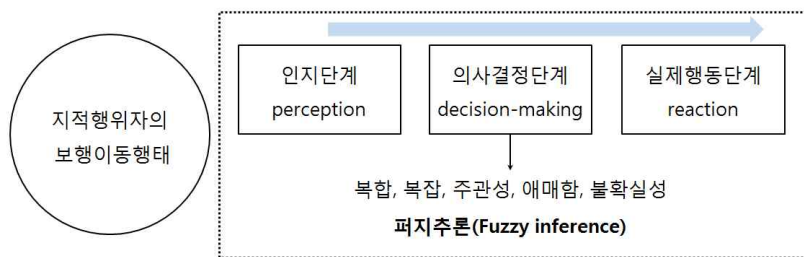
<그림 3-2> 보행이동행태의 지적 행위자

셋째, 보행이동행태 의사결정과정의 불확실성을 고려하기 위하여 퍼지 추론 접근방식을 활용한다. 개인의 의사결정과정은 다양한 요인이 복합적으로 영향을 미치며, 의사결정주체의 주관성, 애매함, 불확실성 등이 포함되기 때문에 의사결정과정을 모형화하는 것은 어렵다(Peeta and Zhou, 2004; 박희제 외, 2008). 본 연구는 인간의 의사결정과정의 애매하고 불확실한 정도를 정량화하고 모형화하는데 장점을 가진 퍼지추론을 토대로 보행이동행태모형을 구축한다. 일반적으로 인간의 행태를 수학적 모형으로 구축하기 위해서는 개인의 의사결정과정이 특정 규칙을 바탕으로 이루어진다는 가정이 필요하다. 개인은 자신의 효용을 최대로 하는 의사결정을 수행하므로 이러한 가정은 적합하며, 의사결정과정을 포함한 행태 및 행동이 반복되면 이를 규칙화하는 것이 가능하다(Helbing, 1992; Nasir et al., 2014).

넷째, 보행자의 보행이동행태는 의사결정과정과 실제행동으로 구분된다. 인간의 행태 변화를 이끄는 단계는 인지단계, 의사결정단계, 실제행



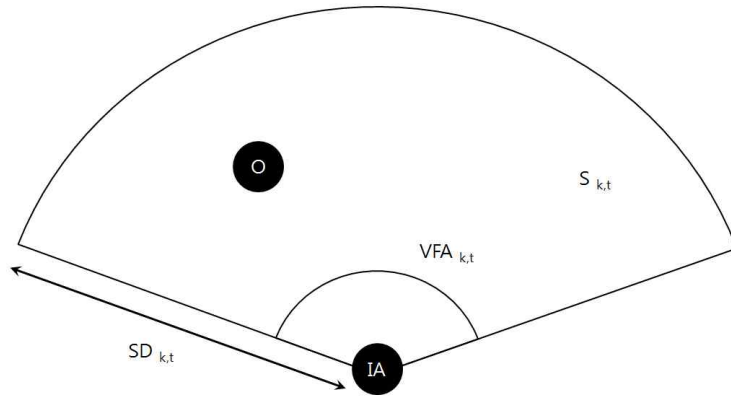
동단계로 세분될 수 있다(Helbing and Molnar, 1995). 먼저, 인간은 시각, 청각 등의 다양한 감각으로 주변상황을 인지하고 개별 판단기준에 따라 의사결정을 수행하며 결과를 실제행동으로 옮긴다. 보행자의 보행이동행태도 마찬가지이다. 보행자는 미시적 환경 조건에 대한 인지단계를 거쳐 의사결정을 내리고, 이를 토대로 실제 행동한다. 의사결정과정과 실제행동단계는 상호연관성을 갖는다.



<그림 3-3> 보행이동행태의 단계

다섯째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 시각인지는 시지각(visual perception)을 통하여 입수된 정보가 경험을 바탕으로 재해석되어서 감정이나 행동으로 나타나는 과정을 의미하며, 일반적으로 인간이 외계를 인식할 때 80% 이상의 정보를 시각을 통해 입수한다(이승재, 2013). 또한 공간인지를 통해 행태를 결정할 때 일반적으로 여러 감각 중 시각이 가장 중요한 역할을 한다(Garling and Evans, 1991). 따라서 본 연구에서는 보행자의 시야범위를 고려하여 시야범위 내의 미시적 환경조건을 대상으로 상호작용이 발생하는 것으로 가정하였다. 보행자 시야범위는 개별특성, 주변 공간특성 등에 따라 차이가 발생할 수 있으나, Fruin (1971), Harris and Dines (1988)에 근거하여 보행이동행태 영향범위를 설정하고, 이는 [식 3-1]과 같이 표현된다.

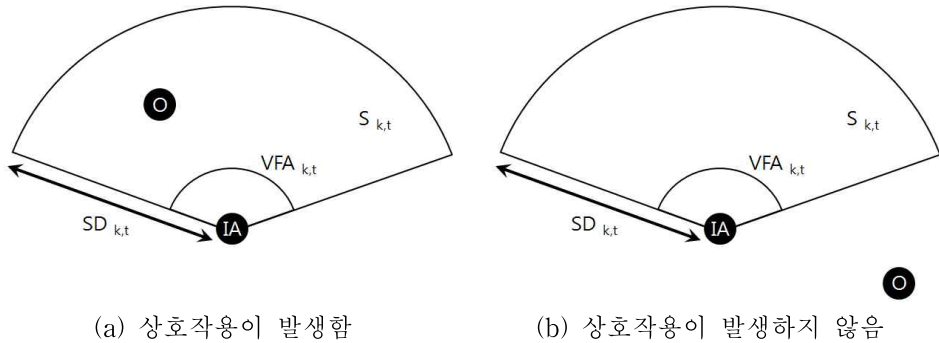
$$S_{k,t} = \frac{1}{2}(SD_{k,t})^2 VFA_{k,t} \quad [\text{식 3-1}]$$



<그림 3-4> 보행이동행태의 영향범위

여기서,  $S_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 보행이동행태 영향범위를 나타낸다.  $SD_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 가 보행에 필요한 공간거리(sensory distance)를 의미하며,  $VFA_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 시야각(visual field angle),  $IA$ 는 의사결정주체인 지적 행위자(intelligent agent),  $O$ 는 장애물 또는 다른 보행자(obstacle)이다.

따라서 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$  내의 미시적 환경조건을 대상으로 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 모형화하고자 한다. <그림 3-5>의  $O \notin S_{k,t}$ 의 경우(b), 즉, 장애물 또는 다른 보행자  $O$ 가 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 에 포함되지 않으면, 보행행태에 영향을 미치는 요인이 충분히 떨어진 것으로 판단하여 상호작용이 발생하지 않는다. 반면  $O \in S_{k,t}$ 인 경우(a), 즉, 장애물 또는 다른 보행자  $O$ 가 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 내에 위치하면 미시적 상호작용이 발생하며, 보행자는 영향요인을 고려하여 방향 또는 속도 수정 행태를 결정한다.



if  $O \in S_{k,t}$

if  $O \notin S_{k,t}$

<그림 3-5> 보행이동행태 영향범위와 상호작용

본 연구 목적은 보행자의 의사결정과정을 고려한 이동행태모형 개발로, 보행자의 의사결정에 영향을 미치는 요인은 크게 환경적 요인과 의사결정주체인 개인의 특성, 문제자체의 성질 등으로 구분가능하다. 먼저, 환경적 요인은 물리적 환경 요인과 사회적 환경 요인으로 세분되며, 보행자의 보행이동행태에 영향을 미치는 물리적 요인은 보행공간의 폭, 크기, 경사 등 보행공간의 속성이 해당된다. 그리고 사회적 환경 요인으로 다른 보행자 및 장애물과의 상호작용이 포함될 수 있다. 일반적으로 보행자는 다른 보행자나 장애물로부터 적정 거리를 유지하려고 하며, 가시적인 범위 내에서 충돌가능성을 발견하면 방향 또는 속도를 조정하여 충돌을 피하는 행태를 보인다. 이와는 반대로 가족이나 친구 등 동반자간에 강한 인력이 작용하는 경우도 있다. 또다른 사회적 환경 요인으로 주변 보행공간의 밀도 등이 있으며, 보행자는 혼잡정도에 따라 보행행태에 영향을 받는다.

두 번째로, 의사결정주체인 보행자의 개별특성이 의사결정과정에 영향을 줄 수 있으며, 성별, 연령, 통행목적, 문화, 성격 등이 여기에 해당된다. 관찰 조사 등과 같은 실증 자료를 통해 보행자의 개별특성이 의사결정과정에 미치는 영향을 조사하기는 어렵다. 따라서 대부분의 연구는 개별특성에 따른 거시적 보행교통류 특성차이를 분석한다. 거시적 접근의

보행교통류 특성으로 대표적인 속도, 밀도, 보행량 조사를 통해 개별특성에 따른 보행행태 차이를 알 수 있다. 일반적으로 연령이 높을수록, 여성보다는 남성이, 비업무보다는 업무 목적의 통행이 보행속도가 높은 것으로 나타나고 있다.

마지막으로 문제자체의 성질은 의사결정과정의 새로움, 불확실성, 복잡성 등을 의미한다. 보행이동행태에서 문제자체의 성질은 보행자의 주관성, 애매함 등의 특성이 포함되며, 행태에 미치는 영향요인이 다양함에 따른 복잡성, 불확실성이 이에 해당한다. 일반적으로 보행행태는 경험을 토대로 한 습관적, 직관적 행태이며, 계속적 반복으로 규칙화가 가능하지만 임의성을 가지고 있다.

## 제 2 절 보행이동행태모형 구축

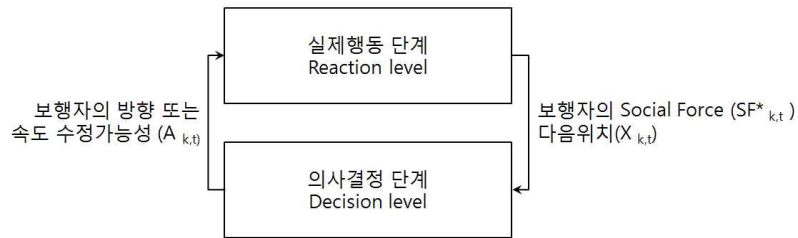
본 연구의 보행이동행태는 개별보행자 단위의 의사결정을 고려한 실행단계의 보행행태로, 의사결정단계(Decision level)와 실제행동단계(Reaction level) 두 단계로 구분된다. 의사결정단계는 보행이동행태에 미치는 영향을 고려하여 개별보행자 단위의 의사결정을 수행하고, 실제행동단계는 의사결정을 토대로 Social Force Model<sup>15)</sup>을 통해 이동행태를 구현한다. 본 절에서는 보행이동행태 모형식을 살펴보고 보행이동행태 의사결정요인 선정과 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 방법론을 제시한다.

---

15) 본 논문 2장의 Social Force Model을 참조.

## 1. 모형식 설정

보행이동행태 모형식은 실제행동단계, 의사결정단계로 구분하여 제시한다. 먼저, 실제행동단계는 보행자의 의사결정을 토대로 실제 행동을 수행하는 단계이다. 의사결정단계에서 도출된 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 을 바탕으로 보행자의 Social Force  $SF_{k,t}^*$ 가 결정된다. Social Force Model에서 Social Force는 가속도 값으로, 이를 토대로 다음 시간대의 속도 및 위치가 결정된다.



<그림 3-6> 실제행동단계와 의사결정단계의 상호연관성

### ① 실제 행동단계

$$SF_{k,t}^* = A_{k,t} \cdot SF_{k,t} \quad [\text{식 3-2}]$$

$$\vec{x}_{k,t+1} = \vec{x}_{k,t} + \vec{v}_{k,t} + SF_{k,t}^* \cdot t \quad [\text{식 3-3}]$$

$$s.t. \quad A_{k,t} = g(\Omega(X_k), \Omega(Y_k), \Omega(Z_k)) \quad [\text{식 3-4}]$$

여기서,

$SF_{k,t}^*$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$A_{k,t}$ 을 기반으로 한 Social Force

$SF_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 Social Force. Social Force

$\vec{f}_k$ 은 목적지로 향하는 힘  $\vec{f}_k^o$ , 척력  $\sum_{\beta} \vec{f}_{k\beta}$ , 인력

$\sum_{\gamma} \vec{f}_{k\gamma}^{ATT}$  등으로 구성

$$SF_{k,t} = \vec{f}_k = \vec{f}_k^o + \sum_{\beta} \vec{f}_{k\beta} + \sum_{\gamma} \vec{f}_{k\gamma}^{ATT}$$

$A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$$A_{k,t} = \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n)$$

$X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 개별특성  $l$

$Y_k^m$  : 보행자  $k$ 의 물리적 환경 요인  $m$

$Z_k^n$  : 보행자  $k$ 의 사회적 환경 요인  $n$

$\Omega(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 각 변수별 방향 또는  
속도 수정가능성(비퍼지값)

$\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치

$\vec{x}_{k,t+1}$  : 시간  $t+1$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치(다음 시간대의 위치)

$\vec{x}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치

$\vec{v}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 속도

## ② 의사결정단계

보행이동행태모형의 의사결정단계는 보행이동행태 영향범위 내의 상호 작용을 고려하여 의사결정을 수행하는 과정이다. 의사결정단계는 시각, 청각 등 다양한 감각을 통해 주변상황을 인지하고 개인의 판단기준에 따라 수정여부를 결정한다. 즉, 보행자는 미시적 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$  내의 여러 환경조건과 상호작용하며 방향 또는 속도 수정 여부를 결

정한다. 이때, 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 는 실제행동단계의 Social Force  $SF_{k,t}$ 을 통해 결정되고, 의사결정단계와 실제행동단계를 상호연관성을 갖는다

의사결정은 전술한 바와 같이 복잡성, 불확실성이 포함되는 문제이므로, 본 연구에서는 퍼지추론을 적용하였다. 의사결정단계의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 이 퍼지추론을 통해 산출된 값으로, 개인의 주관성, 애매함 등의 특성을 포함하고 있다. 또한 보행자의 물리적 환경 요인  $Y_k$ 과 사회적 환경 요인  $Z_k$ 는 보행자 현재위치  $\vec{x}_{k,t}$ 에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} A_{k,t} &= g(\Omega(X_k), \Omega(Y_k), \Omega(Z_k)) & [\text{식 3-5}] \\ &= \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad Y_k &= f(\vec{x}_{k,t}) & [\text{식 3-6}] \\ Z_k &= f(\vec{x}_{k,t}) \end{aligned}$$

여기서,

- $A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성
- $X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 개별특성  $l$  (연령, 성별, 보행목적)
- $Y_k^m$  : 보행자  $k$ 의 물리적 환경 요인  $m$  (보행공간 폭)
- $Z_k^n$  : 보행자  $k$ 의 사회적 환경 요인  $n$  (장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도)
- $l$  : 보행자 개별특성의 개수
- $m$  : 물리적 환경 요인의 개수
- $n$  : 사회적 환경 요인의 개수
- $\Omega()$  : 퍼지추론을 통해 도출된 각 변수별 수정가능성(비퍼지

값)

$\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치, 로짓모형의 표준화 계수를 통해 산정

$Y_k, Z_k$  :  $\vec{x}_{k,t}$ 에 의해 결정

$\vec{x}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치

## 2. 보행이동행태 의사결정요인 선정

보행이동행태에 영향을 미치는 요인은 의사결정 개인의 특성(연령, 성별, 통행목적 등)과 보행공간의 물리적 환경 요인(보행공간의 크기, 경사유무), 장애물(다른 보행자 포함)과의 상호작용을 의미하는 사회적 환경 요인에 이르기 까지 다양하다. 또한 보행자의 경험, 직관, 습관에 의한 경향과 문제자체의 복잡성 등 직접 측정하기 어려운 잠재적 요인이 보행행태에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 파일럿 조사를 거쳐 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고, 보행행태를 보다 객관화하고 실증적으로 분석하기 위하여 확률선택모형을 통한 보행자의 보행이동행태 의사결정과정을 살펴보고자 한다. 의사결정요인 선정에 필요한 자료수집은 실험분석에서 주로 사용되는 잠재선호(Stated Preference, SP)기법을 이용한다. 잠재선호기법은 통계적인 실험계획법을 통해 가상의 시나리오를 구축하고 그 가상의 시나리오를 개인에게 제공하여 개인의 선호를 찾는 일련의 기법으로써, 가상의 상황 하에서 심리적으로 내재되어 있는 개인의 선호의식 또는 의향을 조사하는 것을 목적으로 한다(김강수·조혜진, 2006).

확률효용이론에 기초를 둔 개별행태모형에서 의사결정주체인 각 개인은 자신의 효용이 최대가 되는 대안을 선택한다. 일반적으로 대안의 효용이란 개개인이 대안들 가운데 하나를 선택함으로써 얻게 되는 이익을 의미하며, 구체적으로 속성으로 구성된 대안의 총체적 매력도를 의미한다.

대안의 총 효용은 결정적 효용과 확률적 효용으로 구성되며, 전자는



관측 가능한 요소, 후자는 관측할 수 없는 효용의 요소를 의미한다. 확률적 효용의 분포에 따라 로짓모형, 프로빗모형으로 구분된다. 프로빗모형은 확률분포가 정규분포를 따르고, 이론적으로 타당성을 인정받지만 계산이 복잡하다는 한계를 가지고 있다. 반면 로짓모형은 프라빗모형의 약점을 보완하기 위해 개발되었으며, 확률분포는 Weibull분포를 가진다. 또한 로짓모형은 프로빗모형에 비해 수학적으로 간단하여 모형을 이해하기 쉽다는 장점이 있다(이희연·노승철, 2012). 따라서 본 연구에서는 로짓모형을 활용하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴본다. 보행자  $k$ 가 주어진 조건에서 속도 또는 방향을 수정( $j$ : 유지,  $i$ : 수정)할 확률은 [식 3-7]과 같다. 이를 로짓모형으로 나타내면 [식 3-8]과 같다.

$$\begin{aligned} P_k(i) &= Prob(U_{ik} \geq U_{jk}) \\ &= Prob(V_{ik} + \epsilon_{ik} \geq V_{jk} + \epsilon_{jk}) \end{aligned} \quad \text{[식 3-7]}$$

$$P_k(i) = \frac{e^{V_{ik}}}{e^{V_{ik}} + e^{V_{jk}}} \quad \text{[식 3-8]}$$

여기서,

- $P_k(i)$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 를 선택할 확률
- $U_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 총 효용
- $V_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 결정적 효용
- $\epsilon_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 확률적 효용

### 3. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

보행이동행태는 의사결정과정이며, 보행자의 주관성, 애매함, 불확실성 요소가 포함되므로 본 연구에서는 퍼지추론을 활용한 보행이동행태모형을 개발한다. 즉, 모형식 중 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 을 퍼지추론 과정을 통해 도출한다.

#### 1) 퍼지추론<sup>16)</sup>

##### ① 퍼지집합이론

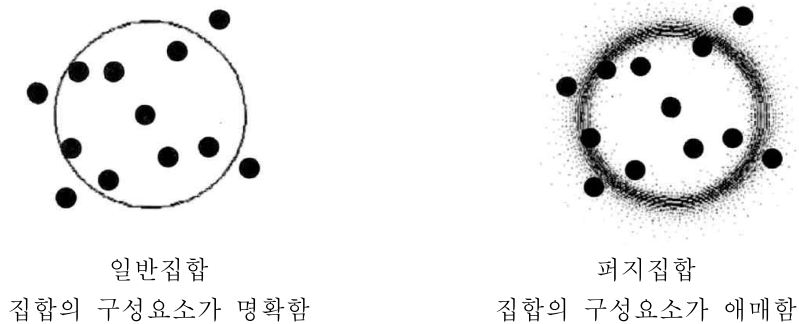
보행자의 의사결정과정을 고려하기 위한 방안으로 퍼지추론과정을 살펴보고자 한다. 퍼지추론 적용에 앞서 퍼지집합이론(Fuzzy Sets)에 대한 간단한 개념을 살펴보고자 한다. 보행자가 현재의 방향 또는 속도를 선택하는데 영향을 미치는 요인은 다양하게 나타날 수 있다. 예를 들어, ‘다른 보행자와의 거리가 가깝다.’, ‘장애물이 정면에 위치하고 있다.’, ‘주변 보행공간의 밀도가 높다.’ 등의 이유로 보행자는 유지하고 있는 속도나 방향을 변경할 수 있다. 이러한 표현은 일종의 애매한 언어적 표현이고, 보행자의 주관적 개념이다. 명확하지 않은 값을 정량화하여 수학적으로 다루고자 할 때 일반적으로 사용하는 개념이 퍼지집합이론이다. 퍼지집합이론은 인간의 언어 및 사고에 관련된 애매함(fuzziness)을 수리적으로 취급할 수 있도록 한다. 즉, 사람이 사용하는 언어적으로 애매한 표현을 효과적으로 처리할 수 있는 방법이다. 퍼지집합이론은 Zadeh에 의해 1965년 최초 제안되었고, 이후 많은 학자에 의해 체계가 성립되고 발전해 오고 있다(Tsoukalas and Uhrig, 1997).

Zadeh는 애매한 특성이 있는 언어적인 값을 정량적으로 기술하기 위해 퍼지집합을 소개하였다. 일반집합(crisp set 또는 non-fuzzy set)의 경

---

16) 임은선(2008), 채석·오영석(1995)을 재정리하였다.

우, 어떤 원소가 특정 집합에 속하는지, 그렇지 않는지에 대한 소속정도가 명확하다. 하지만 일상생활에서 집합의 구성요소를 결정하는 기준이 명확하지 않은 경우가 많으며, 집합을 구분할 때 그 소속이 애매(ambiguity)하여 정확하게 표현하기 어려운 집합이 있다. 예를 들면 ‘키가 큰 사람들의 집합’, ‘나이가 어린 사람들의 집합’ 등이 여기에 해당된다. 이를 퍼지집합이라 하며, 이렇게 애매모호한 집합의 개념을 다루는 방법을 퍼지집합이론이라 한다. 일반집합과 퍼지집합은 <그림 3-7>과 같이 표현될 수 있다.



자료: 임은선(2008).

### <그림 3-7> 일반집합(고전적 집합)과 퍼지집합의 특징

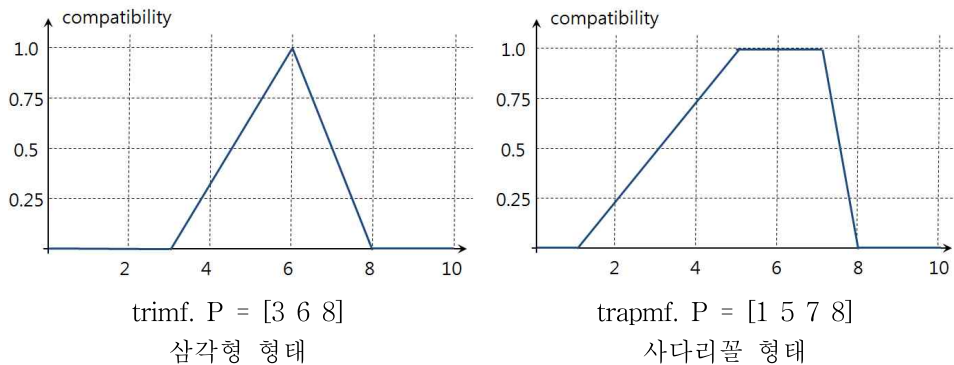
#### ② 소속도 함수

퍼지집합의 포함여부는 소속도 함수(membership function)에 속하는 정도로 표현하며, 이를 위해서는 소속도 함수에 대한 정의가 필요하다. 소속도 함수는 한 원소가 그 집합에 속하는 정도를 나타내는 함수로 소속의 정도를 0과 1사이의 값, 즉 가능성(compatibility, possibility)으로 환산한다. 구체적으로, 어떠한 퍼지변수  $x$ 가 어떠한 집합  $A$ 에 속하는 정도인 소속도  $\mu_A(x)$ 를 나타내는 함수이며, 소속도가 1에 가까우면  $x$ 가  $A$

에 속하는 정도가 높다는 것을 의미하며, 반대로 0에 가까우면 소속도가 낮다는 것을 나타낸다. 소속도 함수는 [식 3-9]와 같이 표현되며, 기본적으로 개인의 주관에 의해 정해지는 것이나, 이러한 주관의 배후에는 일종의 객관성, 공통성이 존재하여야 한다.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad \text{[식 3-9]}$$

가장 많이 쓰이고 간단한 소속도 함수의 형태는 삼각형 소속도 함수(triangular-shaped)이며, 사다리꼴(trapezoidal-shaped), 가우시안(Gaussian distribution curve)을 기반으로 한 소속도 함수 등이 있다. S자, 지수형, L-R(퍼지수를 구성하는 좌우의 부분이 각각 다른 형태로 구성) 형태 등 다양한 형태의 소속도 함수 구축이 가능하다.



자료: MathWorks(2014).

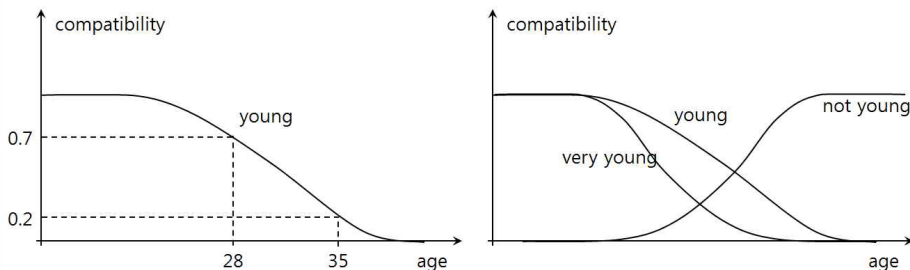
<그림 3-8> 소속도 함수의 형태

### ③ 퍼지집합이론 특성

퍼지집합이론의 가장 특징적인 강점은 부정확하거나 애매한 자료를 적

용하는데도 용이하여 언어적 변수(linguistic variable)를 정량화할 수 있다는 것이다(Zadeh, 1975). 또한 퍼지이론은 개념적으로 이해하기 쉽고, 모형이 유연하다. 임의성, 복잡성을 고려한 비선형 모형에도 이용가능하며, 전문가 경험을 기반으로 모형을 구축할 수 있고, 기존 제어기법과 조합하여 사용이 용이한 장점을 갖는다(Mathworks, 2014).

Zadeh (1975)에서는 애매한 특성이 있는 언어적 변수를 정량적으로 기술하는 과정을 소개하고 있다. <그림 3-9>는 연령(age)에 대한 표현, 즉 언어적 변수로 정량화하는 원리를 보여준다. 그래프에서 ‘젊다(young)’라고 표현하는 언어적 변수에 대한 가능성(집합에 속하는 정도)을 나타낸다. 28세는 0.7로, 35세는 0.2로 정량화된다. 이 가능성에 대한 그래프를 소속도 함수라 하며, 이를 활용하여 ‘젊다’, ‘아주 젊다’, ‘젊지 않다’ 등과 같은 언어적 변수를 표현할 수 있다.



자료: Zadeh(1975).

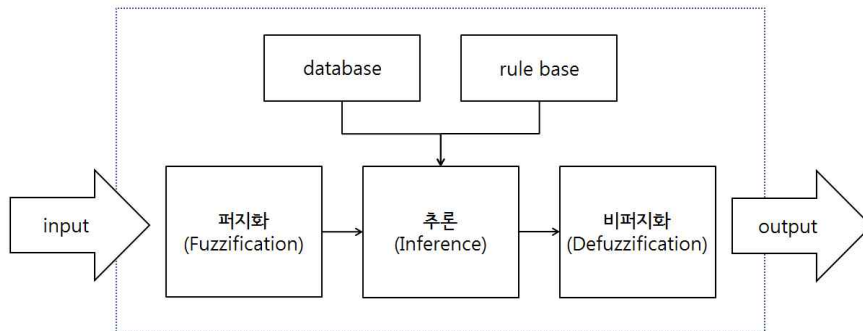
### <그림 3-9> 퍼지집합이론을 이용한 언어적 변수의 정량화

또한 퍼지집합이론을 이용하기 위해서 퍼지집합에 대한 연산을 정의하여야 한다. 일반집합과 같이 퍼지집합도 합집합, 교집합, 여집합 등의 연산이 가능하다. 이때 연산 결과는 단지 원소의 소속만을 결정하는 것이 아니라, 해당 원소의 소속 정도가 어느 정도인지를 밝히는 소속도 함수의 연산이 뒤따라야 한다. 퍼지연산은 다양한 형태를 취할 수 있는데, 일반적으로 두 퍼지집합에 대한 합집합 연산의 경우는 큰 값을 취하는

max 연산, 교집합 연산일 경우는 작은 값을 취하는 min 연산이 주로 사용된다. 또한 이 외에도 product 연산 등 다양한 종류가 있다.

#### ④ 퍼지추론

퍼지논리를 기반으로 의사결정을 수행하는 것을 퍼지추론이라 하며, 퍼지추론은 어떠한 시스템의 작동원리를 언어적 기술을 이용해서 나타내는 방법이다. 퍼지추론에서 언어적 기술은 ‘IF-THEN’ 규칙으로 표현된다. Ross (1995)에 따르면, 퍼지추론은 매우 복잡한 모형에 용이하게 사용되며, 인간의 추론·추리 과정, 지각·인지, 의사결정을 반영하고 있는 등의 장점을 가지고 있다. 퍼지추론은 애매한 상황, 불확실한 상황의 결정이 필요한 상황에 필수적 역할을 할 수 있다. 퍼지추론에서 비퍼지값(crisp value)<sup>17)</sup>을 도출하는 과정은 퍼지화(fuzzification), 추론(inference), 비퍼지화(defuzzification)의 3단계로 구분된다.



<그림 3-10> 퍼지추론 과정

17) 비퍼지값(crisp value)는 fuzzy의 반대개념으로 ‘속하는 정도’가 아닌 하나의 확실한 값을 의미한다.

## ⑤ 퍼지이론 관련 연구

본 연구에서는 보행행태에 영향을 미치는 다양한 요인에 대한 개인의 주관성과 애매함, 그리고 보행자의 의사결정과정을 보행행태모형에 반영하기 위하여 퍼지추론을 활용한다. 인간의 행태는 퍼지(주관성, 애매함, 불확실성, 부정확성) 특성을 가지고 있어, 개별행태가 기반이 되어 형성되는 교통분야에서 퍼지추론은 행태를 모형화하는데 매우 적합한 방법론 중 하나이다. Pappis and Mamdani (1977)는 교통분야에서 퍼지추론을 활용한 최초의 연구로, 독립교차로를 대상으로 신호제어전략을 수립하였다. 이를 시작으로 교통분야에서 퍼지이론이 활발하게 적용되고 있다 (Teodorovic, 1999).

교통부문에서 퍼지추론이 가장 활발하게 적용되고 있는 분야는 경로선택과 차량추종(car following), 차로변경(lane changing) 등 운전자 행태 모형 연구이다. 먼저, 경로선택은 다양한 요인에 영향을 받는 의사결정과정이므로 퍼지추론을 적용하는 사례가 많다(Teodorovic and Kikuchi, 1991; Lotan and Koutsopoulos, 1993; 남궁문 외, 1995; 이상훈 외, 2002; 이상훈·김성환, 2003; 정영근·박창호, 2005). 경로에 영향을 미치는 통행시간은 일반적으로 인지된 통행시간(perceived travel time)으로 이를 퍼지변수로 적용하여 기종점간 경로선택을 구현한 연구가 대표적이다 (Teodorovic and Kikuchi, 1991).

또한 개별운전자 단위의 미시적 행태모형에서도 퍼지추론 접근이 가능하다. 운전자의 행태는 주관성, 애매함 등의 퍼지한 특성을 보이고 있으며, 인간의 사고과정, 의사결정과정이 포함되어 있다. 따라서 퍼지추론은 운전자의 미시적 행태에 영향을 미치는 요인을 정량화하는데 용이한 장점을 가지고 있다(Peeta and Zhou, 2004). 정량화되기 어려운 운전자의 불안감 정도를 측정하고 이를 차량추종, 차로변경모형에 반영하는 연구가 대다수이다(박희제 외, 2008). 또한 퍼지추론은 교통사고 예측모형 등 교통의 다양한 부문에 적용되기도 한다(김장욱 외, 2006).

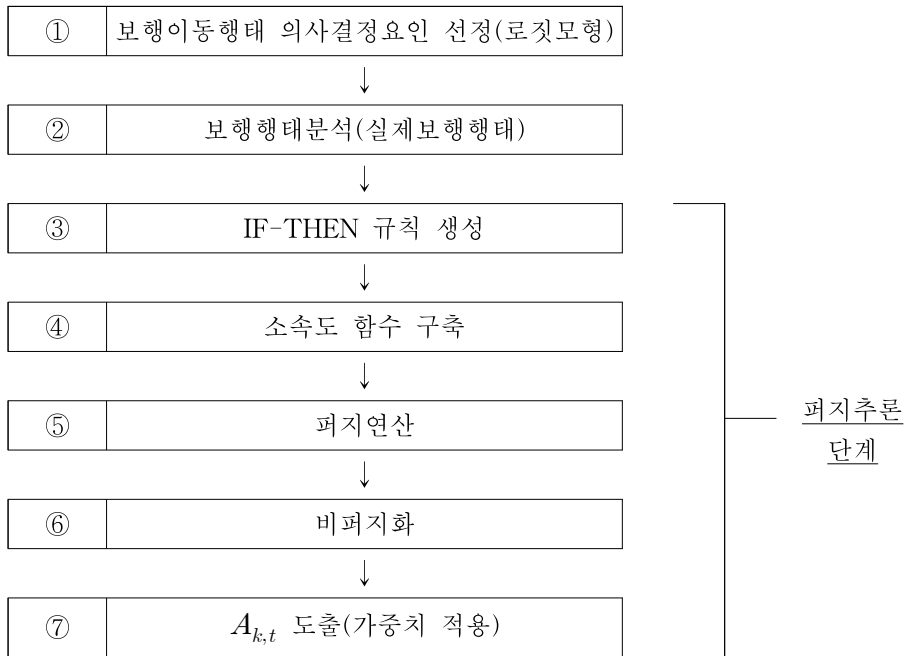
최근 보행행태와 관련하여 퍼지추론을 적용한 사례가 증가하고 있다.

보행자가 주변 환경으로부터 받는 정보는 애매하며, 정보를 습득하고 행태를 선택하는 과정은 인간의 의사결정, 경험적 연구를 기반으로 하므로 보행자 행태에 퍼지추론을 적용하는 접근방법은 적합하다고 할 수 있다 (Golledge et al., 1993; Gerdelen and O'Sullivan, 2010; Nashi et al., 2014). 즉, 퍼지접근방식은 보행자의 지각 반응과정의 주관성, 애매함, 복잡성을 표현하는데 적절하고 신뢰성이 높은 방법론 중 하나이다.

## 2) 퍼지추론의 적용

본 연구에서는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는데 퍼지추론을 적용한다.  $A_{k,t}$  도출 과정은 <그림 3-11>과 같이 크게 7단계로 구분된다. 먼저 로짓모형을 통해 보행이동행태 의사결정에 영향을 미치는 요인을 선정한다. 또한 설명변수와 종속변수 간의 관계를 이용하여 IF-THEN 규칙을 생성한다. 각각의 변수에 대해 애매하고 불확실한 정도를 정량화하기 위한 소속도 함수를 구축하고, 이때 실제 보행행태분석을 통해 퍼지변수의 소속도를 설정한다. 이 후, 퍼지연산을 통해 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부 관계를 정의하고, 비퍼지화 과정을 통해 각 변수별 비퍼지값인 보행자의 속도 및 방향 수정가능성을 산출한다. 일반적으로 보행자의 행태에 영향을 미치는 여러 가지 요인을 종합적으로 고려하기 위하여 변수간 중요도를 통해 최종  $A_{k,t}$  값을 도출한다. 변수간 중요도는 로짓모형 결과를 활용한다.





<그림 3-11> 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정

#### ① IF-THEN 규칙

퍼지추론의 IF-THEN 규칙은 하나의 언어적 변수가 다른 변수에 의존하는 것을 설명하는 조건문이며, 의사결정과정을 표현한다. 함축관계라 불리며, 일반적 형태는 [식 3-10]과 같다.

*IF premise (antecedent), THEN conclusion (consequent).*

*IF x is A, THEN y is B.* [식 3-10]

IF-THEN 규칙 ‘IF x is A, THEN y is B.’에서 ‘x is A’는 조건부(premise 또는 antecedent), ‘y is B’는 결론부(conclusion 또는 consequent)라 하며, 조건부는 객관적 사실을, 결론부는 이를 통해 추론

된 상황을 나타낸다(Ross, 1995). 즉, IF-THEN 규칙은 연역적 추론으로 조건부의 소속도 함수  $\mu_A(x)$ 와 결론부의 소속도 함수  $\mu_B(x)$ 를 연결하는 역할을 한다.

본 연구에서 보행자의 보행이동행태(방향 또는 속도 수정)를 추론하기 위해 생성한 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부는 <표 3-1>과 같다. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  도출을 위한 IF-THEN 규칙의 경우, 조건부는 보행자의 방향 또는 속도(가속도)에 영향을 미치는 다양한 요인을 대상으로 한다. 조건부 변수는 의사결정 보행자의 개별특성, 보행공간의 물리적, 사회적 환경 요인으로 구분된다. 또한 결론부는 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 으로 정의된다.

**<표 3-1> IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부**

구분	내용
조건부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 의사결정 개인(보행자) 특성: 연령, 성별, 통행목적 등</li> <li>• 보행공간의 물리적 속성: 크기, 경사 등</li> <li>• 보행공간 내 사회적 환경 요인(장애물 및 다른 보행자와의 상호작용): 장애물과의 거리, 각도, 상대속도, 주변밀도 등</li> </ul>
결론부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성</li> </ul>

일반적으로 IF-THEN 규칙은 직관적 추론을 근거로 하나, 본 연구에서는 모형의 객관성을 향상시키기 위해, 로짓모형을 토대로 IF-THEN 규칙을 생성하였다.

## ② 소속도 함수 구축

소속도 함수는 언어적 정보를 수학적으로 구현한 것을 의미하며, 언어의 부정확성과 이를 정량화하는 것에 초점을 맞춘다. 예를 들어, ‘장애물과의 거리가 가깝다.’, ‘장애물이 나의 정면에 위치한다.’ 등이 소속도 함

수를 통해 확률로 표현된다.

소속도 함수를 구성하는 것은 중요한 단계이나, 일반적으로 휴리스틱 하거나 주관적 기준에 의해 결정하는 경우가 많다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해, 보행이동행태 분석을 통해 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도 등 실측 자료를 바탕으로 소속도 함수를 구축하고자 한다. 함수 구축은 <표 3-1>의 조건부와 결론부 퍼지변수를 대상으로 한다.

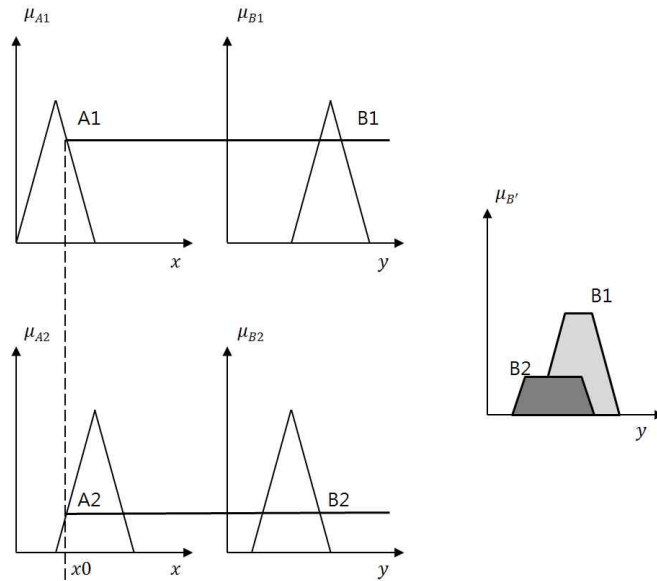
### ③ 연산자

연산자는 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부를 연결하는 관계를 의미하며, 본 연구에서는 가장 일반적인 Mamdani 형태의 연산자를 사용하였다. Mamdani 형식은 직접 추론법 중 하나로 퍼지 함축(implication)시 최소값  $\min$  연산자를 사용하고, 합성(composition)시 최대-최소 max-min 연산을 사용하는 것으로 퍼지추론에서 가장 대표적으로 활용되는 기법이다. 즉, 보행자의 조건부 속성(A)와 연산자  $R$ 에 기반하여 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성(B:  $A_{k,t}$ )을 도출하며, 이러한 관계식은 [식 3-11]과 같이 표현 가능하다.

$$B_i^* = A_i^* \circ R \quad \text{[식 3-11]}$$

$$\begin{aligned} R &= A \times B \\ &= \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \end{aligned}$$

여기서,  $R$ 는 보행자의 조건부 속성  $A_i$ 로부터 결론부 속성  $B_i$ 를 도출해 내는 연산자를 의미한다.



<그림 3-12> Mamdani type의 퍼지추론 연산

#### ④ 비퍼지화를 통한 비퍼지값 도출

비퍼지화는 퍼지추론에서 얻어진 퍼지 결과값을 애매성이 존재하지 않는 비퍼지값으로 변환하는 과정이다. 추론된 출력 퍼지값들에 대응되는 수치들 중 가장 적당한 값을 선택하는 과정으로, 일반적으로 널리 이용되는 비퍼지화 방법은 무게중심법(centroid of area method), 최대값평균법(mean of maximum method) 등이 있다. 무게중심법은 가장 많이 사용되는 비퍼지화 방법으로, 퍼지추론의 결과로 얻어진 퍼지집합의 무게중심을 비퍼지값( $x^*$ )으로 정의한다. 어떤 변수  $x$ 가 어떤 집합  $A$ 에 속하는 정도를  $\mu_A(x)$ 라 할 때, 무게중심법을 활용한 비퍼지값은 [식 3-12]와 같이 표현된다. 최대값평균법은 가능성이 최대로 되는 값들의 평균값을 비퍼지값( $x^*$ )으로 정의하며, [식 3-13]과 같다.

$$x^* = \frac{\int x \cdot \mu_A(x) dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad [\text{식 3-12}]$$

$$x^* = \sum_{m=1}^M \frac{x_m}{M} \quad [\text{식 3-13}]$$

여기서,  $x_m$ 는 소속도 함수가 최대값일 때의  $x$ 값을 의미하고,  $M$ 는 소속도 함수 중 제어함수의 개수이다.

본 연구에서는 무게중심법을 이용하여 각 변수의 방향 또는 속도 수정가능성 값을 산출한다. 일반적으로 Mamdani 형식 추론법에서는 무게중심법이 주로 활용된다. 비퍼지화 과정을 통해 조건부 변수(요인 변수) 각각의 수정가능성 값이 비퍼지값으로 도출된다. 개별변수의 비퍼지값은 [식 3-14]로 표현된다.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad [\text{식 3-14}]$$

여기서,

$x^*$  : 개별변수의 방향 또는 속도 수정가능성

$n$  : 변수별 규칙의 개수

#### ⑤ 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

최종적으로 다양한 요인을 고려한 종합적인 방향 또는 속도 수정가능성은 변수의 중요도를 통해 산정되며 [식 3-15]와 같다. 이때 변수의 중

요도는 로짓모형의 변수별 표준화 계수를 토대로 한다.

$$A_{k,t} = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot y_k^{*,j} \quad [\text{식 3-15}]$$

여기서,

$A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$y_k^{*,j}$  : 요인  $j$ 의 퍼지추론을 통해 산출된 비퍼지값

$N$  : 요인의 개수

$\omega_j$  : 변수  $j$ 의 가중치

## 제 4 장 보행이동행태모형 정산

### 제 1 절 보행이동행태 의사결정요인 선정

본 절에서는 보행행태를 보다 객관적이고 실증적으로 분석하기 위하여 확률선택모형을 통해 보행이동행태 의사결정요인을 선정하였다. 먼저 보행이동행태의 선호도를 살펴보기 위해 설문조사를 실시하고, 선호조사 결과를 통해 퍼지추론 과정에서 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고, 개별행태를 반영한 IF-THEN 규칙을 생성하였다.

#### 1. 보행이동행태 선호조사

##### 1) 예비조사

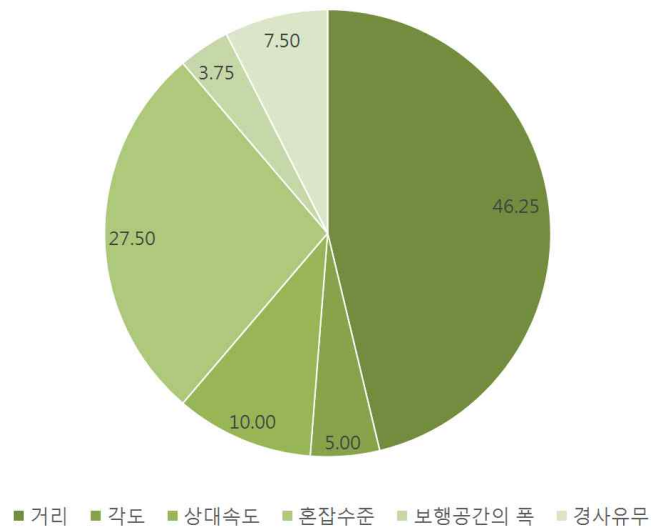
본 조사에 앞서, 파일럿 조사를 통해 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고자 하였다. 보행이동행태에 영향을 미치는 대표적 요인은 <표 4-1>과 같다.

파일럿 조사 결과, 보행이동행태에 가장 큰 영향을 미치는 상위 6개 변수는 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 혼잡수준(밀도), 보행공간의 폭, 경사유무 등이다. 먼저, 보행 속도 또는 방향 수정에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 ‘장애물 또는 다른 보행자와의 거리’로, 응답 비율이 전체의 46.25%를 차지하였다. 이어서, ‘보행공간의 혼잡수준(밀도)’라고 응답한 비율이 27.50%였으며, ‘다른 보행자와의 상대속도(본인에게 다가옴 또는 멀어짐)’가 영향을 미친다는 의견이 전체 응답자의 10.00%로 조사되었다. 물리적 환경 요인인 ‘보행공간의 폭’이 보행행태에 영향을 미친다고 응답한 비율은 3.75%로 가장 낮게 나타났

으며, ‘장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도’, ‘응답자가 위치한 보행 공간의 경사유무’가 각각 5.00%, 7.50%로 관찰되었다.

<표 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인

요인		응답수(명)	비율(%)
사회적 환경 요인	장애물 및 다른 보행자와의 거리	37	46.25
	장애물 및 다른 보행자가 위치한 각도	4	5.00
	상대속도	8	10.00
	혼잡수준(밀도)	22	27.50
물리적 환경 요인	보행공간의 폭	3	3.75
	보행공간의 경사유무	6	7.50



보행자의 보행행태는 보행공간의 크기, 폭, 경사 등과 같은 물리적 환경 요인과 다른 보행자와의 상호작용을 포함하는 사회적 환경 요인에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 선행연구를 살펴보면, 물리적, 사회적 요인 외에도 연령, 성별, 통행목적 등 보행자의 특성이 보행행태에 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Daamen, 2004).



장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 혼잡수준, 폭, 경사 유무 등 응답 비율이 높은 상위 6개 요인 외에 다양한 요인이 보행이동행태에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. <표 4-2>에서 보행행태에 영향을 미치는 기타 요인을 환경 요인, 개별특성 등으로 분류하고 상세내용을 제시하고 있다. 보행행태에 영향을 줄 수 있는 기타 요인을 살펴보면, 먼저 물리적 환경 요인인 보도표면상태가 있다. 보행자는 현재 보행하고 있는 보도의 포장여부, 평탄성 등 보도표면상태에 영향을 받으며, 이는 보행 속도와 질, 심리적 측면까지 영향을 미칠 수 있다.

또한, 동행자 유무, 동행자의 통행속도, 유아동반 여부 등 동행자로 인해, 보행자는 방향 또는 속도를 선택하는 행태에 영향을 받는 것으로 조사되었다. 기존 연구 역시 1인 보행자에 비해 보행규모가 커지면 보행속도는 감소하는 것으로 조사되고 있다(오성훈·이소민, 2013). 또한 지하철, 버스 등 대중교통의 도착, 친구와의 약속 등 시간 제약이 보행행태에 영향을 미친다고 응답한 의견도 있었다. 실증적으로, 교통수단을 이용하거나 통근을 목적으로 하는 보행자들이 일반 시간 제약이 없는 보행자에 비해 보행속도가 빠른 것으로 보고되고 있다(Finnis and Walton, 2008). 마지막으로, 기상상태, 보행공간 청결도와 같은 쾌적성, 위협여부 등이 보행행태에 영향을 미치는 것으로 나타났고 보행이동행태에 미치는 영향요인은 매우 다양한 것으로 조사되었다.

<표 4-2> 보행이동행태 기타 영향요인

구분		내용
물리적 환경 요인	보도	보도 포장여부, 평탄성 등
사회적 환경 요인	동행자	동행자의 보행속도, 동행자 유무, 동행자와의 대화, 동행자의 연령(유아, 고령자 등)
	주변 환경	상업시설, 광고물 등 외부 매력요인
	장애물 및 다른 보행자	장애물의 크기
	돌발상황	사고, 재난, 응급상황 등
보행자 개별특성	제약조건	대중교통 도착시간, 신호 등의 시간적 제약
	소지품	소지품 유무, 크기, 무게, 통화, 휴대폰 사용 등
기타	기상상태	비, 눈 등 기상상태
	쾌적성	보행공간의 청결도
	위험성	위험이 느껴지는 상대
	보행공간의 규칙	우측통행 등의 보행규칙

## 2) 본 조사

### ① 조사개요

파일럿 조사를 통해 본 연구에서는 보행이동행태(방향 또는 속도 수정 행태)에 영향을 미치는 주요 요인을 설정하고 해당 요인에 대한 개인의 보행이동행태 선호조사를 시행하였다. 즉, 보행행태에 영향을 미치는 요인에 대한 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 조사하는 것이 본 선호조사의 핵심내용이다.

조사의 개요는 <표 4-3>과 같다. 먼저, 조사는 2015년 9월 15일~9월

30일 2주간 실시하였으며, 보행의 경우, 인간의 기초적 행태이므로 조사가 용이한 집단을 조사대상집단으로 선정하였다. 실험조사대상은 서울대학교 환경대학원 대학원생 및 가족을 대상으로 하였으며, 총 표본크기는 80명이다. 연령대별(20대, 30대, 40대, 50대 이상) 25%, 성별 비율 5:5로 표본을 할당하고, 조사형식은 1대1 대인면접을 통해 설문을 시행하였다.

<표 4-3> 보행이동행태 선호조사 개요

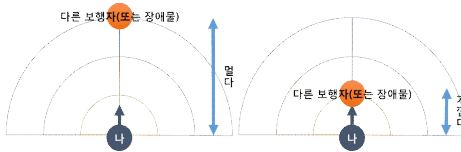
구분		내용
조사기간		2015년 9월 15일~9월 30일 2주간
조사방법		1대1 대인면접조사
조사대상집단		서울대학교 환경대학원 대학원생 및 가족
표본크기		80명
주요 조사내용	응답자 특성	연령, 성별, 통행목적, 통행빈도
	보행이동행태 선호조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>장애물 또는 다른 보행자와의 거리</li> <li>장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도</li> <li>다른 보행자와의 상대속도</li> <li>보행자가 위치한 공간의 폭</li> <li>보행공간의 밀도</li> <li>보행공간의 경사유무</li> </ul> 등의 요인이 보행자의 속도 및 방향 수정가능성에 미치는 영향 조사

파일럿 조사를 통해 응답비율이 높은 상위 6개 요인을 본 조사에 적용하였다. 장애물 또는 다른 보행자와의 거리(가깝다-멀다), 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도(정면-측면), 장애물 또는 다른 보행자와의 상대속도(다가옴-멀어짐), 보행자가 위치한 보행공간의 폭, 경사유무, 보행공간의 밀도(혼잡수준) 등 총 6개 요인으로, 본 연구에서는 이를 대상으로 선호조사 설문을 설계하였다. 더불어, 로짓모형 추정을 위해 선정된 개별특성변수는 보행자의 연령, 성별, 통행목적, 통행빈도 등이다.

## 장애물과의 거리

멀다

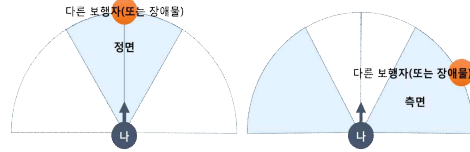
가깝다



## 장애물이 위치한 각도

정면

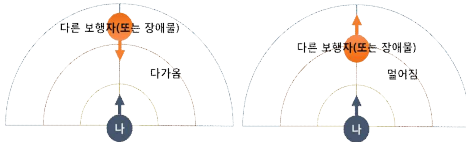
측면



## 상대속도

다가옴

멀어짐



## 보행공간의 폭

넓다

좁다

보행자의 시야 확보가 충분한 곳

예) 보행광장, 대합실 등

물리적 장애물 등으로 인해 보행자의 시야 확보가 어려운 곳

예) 좁은 통로 등

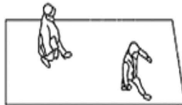
## 보행공간의 혼잡수준(밀도)

혼잡하지 않다

혼잡하다

보행속도 또는 방향 변경이 자유로움

보행속도 또는 방향을 자유롭게 변경할 수 있는 충분한 보행공간이 확보되어 있다



보행속도 또는 방향 변경에 제약 있음

모든 보행자는 보행속도 또는 방향을 임의대로 선택할 수 없는 상태이다



## 보행공간의 경사유무

경사가 없다

경사가 있다

예) 평지



예) 계단, E/S



<그림 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인

<표 4-4> 보행이동행태 의사결정요인 변수설정

구분	내용
환경 요인	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장애물 또는 다른 보행자와의 거리</li> <li>• 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도</li> <li>• 다른 보행자와의 상대속도</li> <li>• 보행자가 위치한 공간의 폭</li> <li>• 보행공간의 밀도</li> <li>• 보행공간의 경사유무</li> </ul>
개별특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보행자의 연령</li> <li>• 보행자의 성별</li> <li>• 통행목적(업무통행과 비업무통행으로 구분)</li> <li>• 통행빈도(보행교통 빈도)</li> </ul>

## ② 조사설계

선호의식 자료수집에 있어서, 응답자의 심리적 부담을 줄이고 보다 정확한 자료구축을 위해 설문내용을 간략하게 구조화 하였으며, 6개의 요인 각 인자에 대해 2가지 수준으로 구분하였다. 요인별 수준 설정은 <표 4-5>와 같다.

<표 4-5> 영향요인과 수준설정

요인 수준	거리	각도	상대속도	공간 폭	밀도	경사
1수준	멀다	정면	멀어짐	좁다	높다	없다
2수준	가깝다	측면	다가옴	넓다	낮다	있다

완전배치 요인설계<sup>18)</sup>로 설문을 구성할 경우, 질문의 양이 많아져 응답

18) 완전배치 요인설계는 속성변수와 수준의 모든 경우와 조합을 고려하는 경우를 의미한다.

자의 피로를 유발하고, 응답오차가 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 설문지의 효율향상을 위해 실험계획법<sup>19)</sup> 중 부분배치 요인설계를 이용하였다. 부분배치 요인설계는 주어진 선택대안 및 수준수의 모든 조합을 고려하지 않고 상호작용의 일부분만을 고려하는 설계방법을 의미한다. 본 연구에서는 직교계획(orthogonal design)을 활용하여 <표 4-5>의 총 6개 변수, 2가지 수준에 대해 총 8개의 가상상황 시나리오를 작성하였다. 최종 선정된 가상 시나리오는 <표 4-6>과 같다. 또한 시나리오별 보행자의 속도 및 방향 수정에 대한 응답을 리커트식 척도(likert scale)로 측정하여 선호조사를 수행하였다. 응답자의 이해를 돕기 위해 가상상황에 대한 시나리오를 그림과 함께 제시하였다. 보행이동행태 설문조사지는 부록에 첨부하였다.

<표 4-6> 보행이동행태 선호조사를 위한 시나리오

시나리오	거리	각도	상대속도	공간 폭	밀도	경사
1	멀다	측면	멀어짐	좁다	낮다	있다
2	가깝다	측면	다가옴	넓다	낮다	있다
3	가깝다	정면	멀어짐	좁다	높다	있다
4	멀다	측면	다가옴	좁다	높다	없다
5	가깝다	정면	다가옴	좁다	낮다	없다
6	가깝다	측면	멀어짐	넓다	높다	없다
7	멀다	정면	다가옴	넓다	높다	있다
8	멀다	정면	멀어짐	넓다	낮다	없다

19) 실험계획법은 관심 있는 가상적인 상황을 정밀하게 검증하기 위해 속성변수와 수준을 조합하는 일련의 방법이라 할 수 있다. 즉, 주어진 속성변수와 수준을 이용하여 통계적인 방법으로 최소의 질문에서 최대의 선호 정보를 얻을 수 있도록 가상적인 상황을 만드는 일련의 과정이라 할 수 있다(김강수·조혜진, 2006).

### ③ 조사결과

먼저 설문조사의 연령, 성별, 통행목적 등 응답자 특성을 요약하면 <표 4-7>과 같다. 응답자의 통행목적은 출퇴근, 등하교 등의 업무 목적으로 주로 보행한다고 응답한 비율이 전체의 57.5%였으며, 쇼핑, 여가 및 오락 등의 목적은 42.5%이다. 통행빈도에 대한 응답 결과는 전체 응답자의 76.3%가 주 3회 이상 보행하는 것으로 응답하였으며, 주 1회 미만으로 보행하는 응답자는 전체의 3.8%에 해당한다.

<표 4-7> 응답자 특성 조사 결과

구분		응답수(명)	비율(%)
성별	남성	40	50.0
	여성	40	50.0
연령 (평균 : 40.6세 표준편차 : 13.0세 최소~최대 : 21~67세)	20대(21세 이상 30세 미만)	20	25.0
	30대(31세 이상 40세 미만)	20	25.0
	40대(41세 이상 50세 미만)	20	25.0
	50대(51세 이상 60세 미만)	10	12.5
	60대(61세 이상 70세 미만)	10	12.5
통행목적	업무, 출퇴근, 등하교 등	46	57.5
	비업무(쇼핑, 여가 및 오락 등)	34	42.5
통행빈도	주 7회	31	38.8
	주 3회 이상~7회 미만	30	37.5
	주 1회 이상~3회 미만	16	20.0
	주 1회 미만	3	3.8

또한 각 요인에 대한 보행이동행태 선호조사 결과, 시나리오 8(장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 멀고, 정면에 장애물 또는 다른 보행자가 위치하고 있으며, 의사결정 보행자와 멀어지는 방향으로 이동한다. 현재

보행공간은 평지이며 폭은 넓다. 그리고 혼잡하지 않다.)의 경우, 방향 또는 속도를 수정한다고 답한 응답자수는 2명으로 전체의 2.5%에 불과한 것으로 나타났다. 반면, 시나리오 5(장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가깝고, 정면에 장애물 또는 다른 보행자가 정면에 위치하고 있으며, 의사결정 보행자에게 다가오는 방향으로 이동한다. 현재 보행공간은 평지이며 폭은 좁다. 그리고 혼잡하지 않다.)의 경우 전체의 93.8%인 75명이 방향 또는 속도를 수정한다고 답하였다. 8개의 가상 시나리오별 방향 또는 속도 수정가능성 응답결과는 <표 4-8>과 같다.

<표 4-8> 시나리오별 수정가능성 응답결과

시나리오	가상상황	5점 척도 평균	방향 또는 속도 수정가능성*		수정 비율 (%)
			유지	수정	
1	거리(멀다), 각도(측면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(좁다), 밀도(낮다), 경사(있다)	1.99	73	7	8.8
2	거리(가깝다), 각도(측면), 상대속도(다가옴), 공간폭(넓다), 밀도(낮다), 경사(있다)	3.69	29	51	63.8
3	거리(가깝다), 각도(정면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(좁다), 밀도(높다), 경사(있다)	3.43	44	36	45.0
4	거리(멀다), 각도(측면), 상대속도(다가옴), 공간폭(좁다), 밀도(높다), 경사(없다)	2.74	63	17	21.3
5	거리(가깝다), 각도(정면), 상대속도(다가옴), 공간폭(좁다), 밀도(낮다), 경사(없다)	4.61	5	75	93.8
6	거리(가깝다), 각도(측면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(넓다), 밀도(높다), 경사(없다)	2.70	58	22	27.5
7	거리(멀다), 각도(정면), 상대속도(다가옴), 공간폭(넓다), 밀도(높다), 경사(있다)	3.08	53	27	33.8
8	거리(멀다), 각도(정면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(넓다), 밀도(낮다), 경사(없다)	1.50	78	2	2.5

주: \* 속도 또는 방향을 유지하는 경우와 수정하는 경우는 각각 리커트식 척도 1, 2, 3과 4, 5로 구분된다(본 논문의 pp. 80~81 참조).



## 2. 보행이동행태 의사결정요인 선정결과

### 1) 변수설정

보행이동행태는 보행자가 행태를 변경하는 경우와 그렇지 않은 경우로 한정되기 때문에 본 연구는 이항선택상황에 해당한다. 따라서 이항로짓모형을 통해 의사결정요인을 분석하고 이때 설명변수는 <표 4-9>와 같이 설정하였다. 보행자 특성과 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 폭 등과 같은 속성들은 방향 또는 속도를 수정하거나 유지하는 2가지 대안 중 한쪽을 선택하게 되는 경우 얻게 되는 효용을 만들어낸다. 보행이동행태에서 대안의 효용은 보행자가 주변 미시적 상호작용으로부터 느끼는 만족도와 관련되어 있다.

<표 4-9> 로짓모형의 설명변수 설정

변수		내용	
개별특성	연령	실제나이	
	성별	남자: 1, 여자: 0	
	통행목적	통근, 통학 등 업무: 1 쇼핑, 오락 등 비업무(여가): 0	
	통행빈도	주 7회: 3, 주 3회 이상~7회 미만: 2, 주 1회~3회 미만: 1, 주 1회 미만: 0	
보행특성 변수	사회적 요인	거리	가깝다: 1, 멀다: 0
		각도	정면: 1, 측면: 0
		상대속도	다가옴: 1, 멀어짐: 0
		주변밀도	낮음: 1, 높음: 0
	물리적 요인	공간크기(폭)	좁다: 1, 넓다: 0
		경사	없다: 1, 있다: 0

본 연구는 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고 IF-THEN 규칙 생성, 변수간 가중치를 산정하기 위해 선호조사를 수행하였다. 이에 통행빈도에 따라 4개 카테고리로 구분하고, 통행빈도와 수정가능성은 선형관계로 가정하였다.

보행이동행태 의사결정요인 선정을 위한 로짓모형에서 방향 또는 속도 수정여부를 결정하는 대안의 결정적 효용은 [식 4-1]과 같이 구성된다.

$$V = \alpha_0 + \sum_{l=1}^l \beta_l X_k^l + \sum_{m=1}^m \gamma_m Y_k^m + \sum_{n=1}^n \delta_n Z_k^n \quad [\text{식 4-1}]$$

여기서,

$\alpha_0$  : 상수

$X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 특성

연령, 성별, 보행목적, 통행빈도 등

$\beta_l$  : 개별특성(연령, 성별, 보행목적, 통행빈도)의 상관계수

$Y_k^m$  : 물리적 환경 요인

보행공간의 폭, 경사유무 등

$\gamma_m$  : 물리적 환경 요인(공간 폭, 경사)의 상관계수

$Z_k^n$  : 사회적 환경 요인

미시적 상호작용에 영향을 주는 요인으로 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도와 보행자가 위치한 보행공간의 혼잡정도를 나타내는 밀도 등이 포함

$\delta_n$  : 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 혼잡정도)의 상관계수

로짓모형을 추정함에 있어, 선호조사의 리커트식 척도(1~5)와 이항로

깃모형(0, 1)간 일관성을 유지시킬 필요가 있다. 리커트식 척도에서 중간 응답(mid-point)에 대한 분석방법은 다양하다. 일반적으로 응답자는 의견에 확신이 없는 경우(undecided) 또는 실제 중립(neutral) 상황일 경우 중간응답을 하는 것으로 나타나고 있다(Armstrong, 1987).

보행이동행태에 있어 현재의 방향 또는 속도를 유지하는 것 보다 수정하는데 의사결정자의 노력이 더 필요하고, 본 연구 목적이 보행자의 방향 또는 속도 수정행태에 영향을 미치는 명확한 요인을 선정하고 영향정도를 분석하기 위함이므로 리커트식 척도의 중간응답(3: 그저 그렇다)은 방향 또는 속도를 유지하는 대안으로 포함하였다.

본 연구에서는 선호조사에서 ‘1: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 전혀 없다.’, ‘2: 가능성이 낮다.’, ‘3: 그저 그렇다.’로 응답한 경우를 방향 또는 속도를 유지하는 것으로 분류하고, ‘4: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.’, ‘5: 매우 높다.’의 경우를 속도 또는 방향을 수정하는 것으로 설정하였다. 또한 해당 경우가 유지(1, 2), 수정(3, 4, 5)로 분류한 경우에 비해 로짓모형의 적합도를 의미하는 우도비( $\rho^2$ )가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.<sup>20)</sup> 선호조사의 리커트식 척도(1~5)와 이항로짓모형(0, 1)간 일관성을 고려한 종속변수는 <표 4-10>과 같다.

<표 4-10> 이항로짓모형의 종속변수 설정

구분	내용
방향 또는 속도를 유지함(0)	<p>리커트식 척도 1, 2, 3으로 설정</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 전혀 없다.</li> <li>• 2: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.</li> <li>• 3: 그저 그렇다.</li> </ul>
방향 또는 속도를 수정함(1)	<p>리커트식 척도 4, 5로 설정</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.</li> <li>• 5: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.</li> </ul>

20) 유지(1, 2), 수정(3, 4, 5)로 분류한 경우 모형의 우도비는 0.277이다.

## 2) 추정 결과

80명을 대상으로 각 8개 시나리오에 대해 조사하여 모두 640개 선호의 식자료를 수집하고, 이항로짓모형을 적용하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 로짓모형의 추정결과는 <표 4-11>과 같다. 먼저 모형의 적합도를 나타내는 우도비( $\rho^2$ )는 0.307이고, 적중률(hit ratio)은 평균 79.5%로 모형의 설명력은 비교적 높은 수준으로 나타났다. 또한 연령, 성별, 통행목적, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 폭의 추정계수가 10% 수준에서 유의미한 것으로 분석되었다.

연령 변수의 추정계수는 -0.035로 음(-)의 부호를 가지고 있고, P값은 0.000으로 1% 수준에서 유의미한 것으로 나타났다. 이는 동일한 보행조건에서 고령자일수록 방향 또는 속도 수정가능성이 줄어드는 것을 의미한다. 성별의 추정계수는 0.434로, 여자보다 남자의 방향 또는 속도 수정가능성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 통행목적은 비업무에 비해 업무통행의 보행자가 수정가능성이 높은 것으로 설명되나, 이는 10% 수준에서만 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

또한 사회적 환경 요인의 영향 정도를 살펴보면, 장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가까울수록, 측면보다는 정면에 장애물이 위치할수록 방향 또는 속도 수정가능성이 높아지는 것으로 나타났다. 상대속도는 의사결정자에게 다가올수록, 또한 보행공간의 폭이 좁을수록 수정가능성 값이 높아지는 것으로 분석되었다.

<표 4-11> 로짓모형 추정결과

종속변수 (수정=1, 유지=0)					
변수명	추정 계수	표준오차	유의 확률	Odds비	표준화 계수
상수	-3.003	0.545	0.000		
연령	-0.035	0.008	0.000	0.965	-0.253
성별	0.434	0.209	0.038	1.544	0.120
목적	0.364	0.219	0.097	1.439	0.099
빈도	0.129	0.125	0.303	1.137	0.060
거리	2.426	0.247	0.000	11.314	0.669
각도	0.830	0.232	0.000	2.294	0.229
상대속도	2.045	0.246	0.000	7.730	0.564
폭	0.508	0.217	0.019	1.662	0.140
밀도	0.125	0.241	0.603	1.133	0.035
경사	0.111	0.231	0.630	1.118	0.031
표본크기	640				
logL	-292.335				
logL0	-421.838				
우도비( $\rho^2$ )	0.307				
적중률	0.795				
표본구성 (표본크기, 구성비율)	1(수정)	237		37.0%	
	0(유지)	403		63.0%	

반면 통행빈도, 보행공간의 혼잡수준(밀도), 공간의 경사 등의 변수는 본 연구의 설문조사에서 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 보행이동행태는 인간의 기본적, 기초적 보행행태로 통행빈도와는 상관성이 부족한 것으로 판단된다. 그러나 공간의 혼잡수준, 경사 유무에는 영향을 받는 것으로 조사된 연구도 있다(Cheung and Lam, 1998; 윤상원·

배상훈, 2007). 경사의 상, 하행 구간에 따라 보행행태는 차이가 있고, 혼잡구간에서 보행자의 방향 또는 속도 수정행태는 의사결정과정으로 설명되기에는 한계가 있으므로, 본 연구에서는 해당 변수는 제외하고 유의미한 변수만을 대상으로 보행이동행태모형을 개발하였다.

일반적으로 추정계수가 a일 때, 설명변수의 단위를 하나 증가시키면 종속변수에서 a로짓 만큼의 증가가 있다고 해석된다. 따라서 추정계수보다 Odds비<sup>21)</sup>가 모형을 설명하는 데 해석이 용이한 경우가 있다. Odds비는 카테고리 구분별 Odds를 비교하는 값으로, Odds비가 1보다 큰 경우 양(+)의 관계를 가지고 있으며, 1보다 작은 경우는 음(-)의 관계를 나타낸다.

예를 들어 성별의 경우, Odds비는 1.544로 나타났으며, 여성에 비해 남성의 Odds가 1.544배인 것을 의미한다. 다른 요인이 동일한 상황에서 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률을 살펴보면, 남성이 여성에 비해 방향 또는 속도를 수정할 확률이 54.4% 높은 것으로 나타났다(<표 4-12> 참조).

**<표 4-12> 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화**

구분		방향 또는 속도 수정 확률	수정 확률의 변화량	Odds	Odds비
성별	여성	21.0		0.266	
	남성	29.1	8.1	0.410	1.544

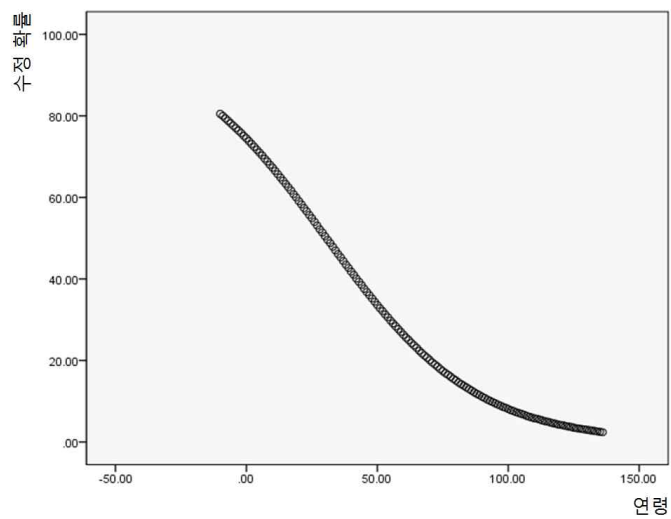
또한 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률을 살펴보면 추정계수는 -0.035로 고령자일수록 보행행태를 수정하고자 하는 확률을 낮아지는 것으로 나타났다. 연령 증가에 따른 수정 확률 변화량은 29~30세의 경우 -0.9포인트 감소하며, 연령이 1살 많아질수록 방향 또는 속도를 수정할

21) Odds은 어떠한 사건이 일어날 확률과 일어나지 않을 확률 간의 비율을 의미하며, Odds비는 비교 대상이 되는 그룹 간의 Odds을 비교한 값이다.

가능성은 3.5% 감소하는 것으로 설명된다(<표 4-13> 참조). 수정확률을 그래프로 표현하면 <그림 4-2>와 같이 로지스틱 함수 형태로 나타난다.

<표 4-13> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화

구분		방향 또는 속도 수정 확률	수정 확률의 변화량	Odds	Odds비
연령	29	51.4		1.057	
	30	50.5	-0.9	1.020	0.965
	31	49.6	-0.9	0.985	0.965



<그림 4-2> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률

## 제 2 절 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

보행이동행태모형 구축을 위한 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 추정하기 위하여 퍼지추론을 활용하였다. 퍼지추론은 크게 IF-THEN 규칙 생성, 소속도 함수 구성, 연산, 비퍼지화 과정으로 구분되며, 이를 통해 도출되는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 은 [식 4-2]와 같다. 보행행태에 영향을 미치는 요인은 앞서 추정한 로짓모형을 토대로 유의미한 변수를 대상으로 하였다.

$$\begin{aligned}
 A_{k,t} &= \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n) & [\text{식 4-2}] \\
 &= \omega_1 \Omega_A(X_k^A) + \omega_2 \Omega_G(X_k^G) + \omega_3 \Omega_P(X_k^P) + \omega_4 \Omega_S(Y_k^S) \\
 &\quad + \omega_5 \Omega_D(Z_k^D) + \omega_6 \Omega_{AN}(Z_k^{AN}) + \omega_7 \Omega_R(Z_k^R)
 \end{aligned}$$

여기서,

- $A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성  
(변수간 가중치를 적용한 최종 비퍼지값을 의미)
- $X_k^l$  : 개별특성(연령, 성별, 통행목적)
- $Y_k^m$  : 물리적 환경 요인(보행공간 폭)
- $Z_k^n$  : 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도)
- $\Omega_A(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 연령에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_G(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 성별에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_P(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 통행목적에 따른 수정가능성(비퍼지값)



- $\Omega_S(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 보행공간의 폭에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_D(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물과의 거리에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_{AN}(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_R(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물의 상대속도에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치
- $i$  : 보행이동행태 영향요인 개수

즉, 보행자의 개별특성, 물리적 환경 요인, 사회적 환경 요인을 통해 보행자는 방향 또는 속도 수정가능성을 결정한다. 그리고  $\Omega$ 는 퍼지추론을 통해 도출되는 비퍼지값을 의미한다.

## 1. IF-THEN 규칙

퍼지추론의 IF-THEN 규칙은 일반적으로 전문가 의견, 기존 연구, 객관적 사실 등을 통해 언어를 기반으로 만들어질 수 있다. 보행이동행태는 외부(물리적 요인, 사회적 요인 등)로부터 받아들이는 지각에 의존하는 행태이므로, 이는 IF-THEN 규칙으로 구성이 가능하다.

본 연구에서는 로짓모형에서 선정된 유의미한 변수만을 대상으로 하며, 설명변수와 종속변수 간 상관관계를 고려하여 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 결과, 본 연구의 IF-THEN 규칙은 기존 연구와 유사한 행태를 보이는 것으로 나타났다. IF-THEN 규칙은 조건부와 결론부로 구성되며, 전자는 보행자의 개별특성, 환경 요인 등이 포함되며, 후자는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성이다. 예를 들면, ‘장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가까우면, 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높

다.’ ‘연령이 높을수록, 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 낮다.’ 등으로 설정될 수 있으며, 조건부 변수, 결론부 변수 등은 상, 중, 하 등 몇 개의 수준으로 구분가능하다. 실제로 연령 또는 거리 등 보행이동행태에 영향을 미치는 요인과 위 단계는 정확히 매칭될 수 없기 때문에 퍼지추론이 필요하며, 퍼지이론을 통해 언어적 주관성을 정량화한다. 본 연구의 IF-THEN 규칙은 <표 4-14>와 같다.

<표 4-14> IF-THEN 규칙 생성

구분	조건부	결론부
연령	if(보행자의 나이가 어리다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자의 나이가 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(보행자의 나이가 많다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
성별*	if(보행자는 남자다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자는 여자다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
통행목적*	if(보행자의 통행목적은 업무관련이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자의 통행목적은 여가관련이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
장애물과 의 거리	if(장애물과 거리가 가깝다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(장애물과 거리가 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(장애물과 거리가 멀다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)

<표 4-14> 계속

구분	조건부	결론부
장애물이 위치한 각도	if(장애물이 보행자의 정면에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(장애물이 보행자의 정면과 측면 중간에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(장애물이 보행자의 측면에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
상대속도	if(다른 보행자가 다가온다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(동일한 속도로 이동한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(다른 보행자가 멀어진다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
보행공간 폭	if(보행공간의 폭이 넓다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
	if(보행공간의 폭이 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(보행공간의 폭이 좁다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)

주: \* 조건부 변수 중 성별, 통행목적은 경계가 명확한 일반집합에 해당한다.

## 2. 소속도 함수

퍼지변수의 소속도 함수는 퍼지변수의 값을 0과 1사이의 값으로 표현한 것이며, 변수의 확률값을 의미한다. 원소가 집합에 속하는 정도는 언어의 부정확성을 정량화하는 기능을 가진다(Peeta and Yu, 2002).

본 연구에서는 IF-THEN 규칙의 조건부, 결론부에 해당하는 퍼지변수를 대상으로 소속도 함수를 구성하였다. 소속도 함수 구축에 있어, 일부 영상자료 분석을 통해 자료 구득이 가능한 변수는 실제 행태를 바탕으로

하고, 그 외 변수는 객관적 사실을 근거로 설정하였다. 소속도 함수는 삼각형 형태(trimf)와 사다리꼴 형태(trapmf)를 주로 사용하였다.<sup>22)</sup> 일반적으로 소속도 함수가 삼각형이면 퍼지수의 표현이 간단하고 또한 연산이 비교적 간단하므로 흔히 사용되고 있다(채석·오영석, 1995).

## 1) 영상자료 분석

보행자의 방향 또는 속도 수정 행태에 미치는 영향을 현장 조사를 통해 알아내기는 쉽지 않다. 그러나 제한적 요인이라도 보다 실증적이고 객관적인 자료를 수집하고 이에 따른 보행행태를 모형화하기 위해 본 연구에서는 영상자료 분석을 통해 보행행태를 살펴보았다. 본 분석의 주목적은 보행자와 미시적 환경조건과의 상호작용을 분석하여 퍼지변수의 소속정도를 결정하는 소속도 함수를 구축하기 위함이다.

일반적으로 보행행태 조사는 크게 속도, 밀도, 보행량 등 거시적 수준의 변수 조사가 대다수이다. 거시적 보행교통류 특성은 보행자와 장애물 또는 다른 보행자간의 상호작용, 개인의 의사결정과정, 사회적, 심리적 요인 등 미시적 보행행태를 설명하지 못한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 영상자료 분석을 통해 개별보행자 단위의 행태를 살펴보고자 하였고, 방향 또는 속도 수정 행태 중 방향 수정 행태에 초점을 맞추어 조사하였다.

먼저 보행자 궤적정보를 토대로 회피시작 시점<sup>23)</sup>에서 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도 등을 조사하였다. 여기서 회피시작 시점은 관측자료로 판단하기 어려우므로 장애물이 보행자의 진행방향에 존재하며 일반적인 이동방향 변화량(평균)보다 방향이 크게 변하는 경우로 설정하였다(성기범 외, 2011).

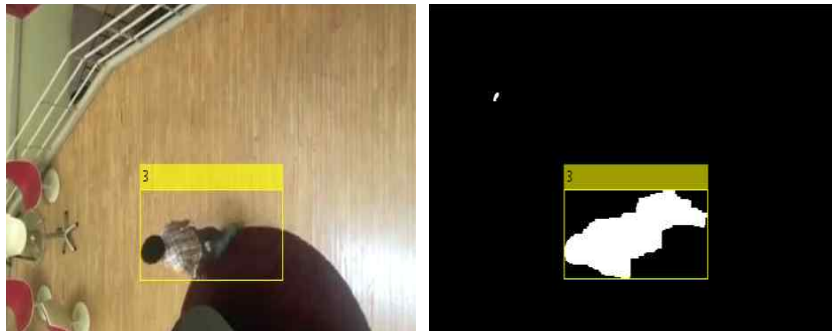
보행자 궤적정보는 Matlab 중 Computer Vision System Toolbox<sup>24)</sup>의

---

22) trimf는 Triangular shaped membership function, trapmf는 Trapezoidal shaped membership function의 약자이다.

23) 보행자의 방향 또는 속도 수정 의사결정이 이루어진 시점을 의미한다.

Motion-Based Multiple Object Tracking을 활용하였다. Motion-Based Multiple Object Tracking은 물체의 움직임을 기반으로 궤적을 추정하는 방법으로 각 프레임 내의 이동물체를 검지하여 시간에 따른 궤적정보를 산출한다. 이때 이동물체 검지에는 가우시안 혼합 모델(gaussian mixture model)<sup>25)</sup>을 활용한 배경제거 알고리즘을 이용되고, 동일한 물체의 궤적은 칼만 필터(kalman filter)<sup>26)</sup>에 의해 추정된다. 본 연구에서는 보행 영상자료로 개별보행자의 궤적을 산출하고, 이상치를 제거한 후 미시적 보행행태를 실증적으로 살펴본다.



<그림 4-3> Matlab의 이동물체 검지

영상자료를 통한 보행행태 분석을 위해, 먼저 분석에 필요한 변수를

- 
- 24) Matlab의 Computer Vision System Toolbox은 컴퓨터 비전, 영상처리와 관련된 설계, 시뮬레이션을 위한 알고리즘, 기능 및 애플리케이션을 제공하며, detection·extraction·matching, object detection·tracking, motion·estimation, video processing 등의 분석이 가능하다(Mathworks, 2014).
- 25) 가우시안 혼합 모델은 여러 개의 가우시안 확률밀도함수로 데이터의 분포를 모델링하는 방법이다. 영상에서 각각의 픽셀값에 해당하며 배경의 학습을 통해 배경모델이 형성되며 이를 이용해 이동물체를 검지한다.
- 26) 칼만 필터는 예측단계와 보정단계의 두 단계로 구성된 필터로 먼저 이전 시간에 추정된 상태에 대해 예상되는 상태를 계산한다. 예측단계와 실제측정상태를 토대로 정확한 상태로 보정한다. 이를 통해 물체의 궤적정보를 생성한다.

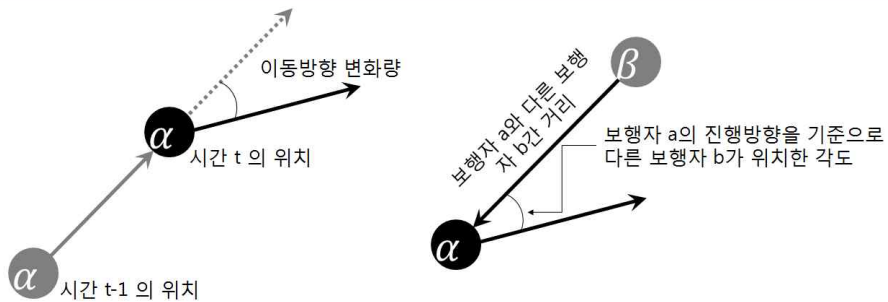
다음과 같이 정의하였다.

① 보행자  $\alpha$ 의 보행 특성변수

시간  $t$ 에서 의사결정주체 보행자  $\alpha$ 를 기준으로 현재위치  $\vec{x}_{\alpha,t}$ , 현재 속도  $\vec{v}_{\alpha,t}$  ( $\vec{v}_{\alpha,t} = \vec{x}_{\alpha,t} - \vec{x}_{\alpha,t-1}$ )를 벡터로 표현하고, 시간  $t-1$ 의 진행방향과 시간  $t$ 의 진행방향의 차를 이동방향 변화량  $\theta_{\alpha,t}$  ( $\vec{v}_{\alpha,t-1} \cdot \vec{v}_{\alpha,t} = |\vec{v}_{\alpha,t-1}| |\vec{v}_{\alpha,t}| \cos \theta_{\alpha,t}$ )으로 설정하였다.

② 장애물 또는 다른 보행자  $\beta$ 와의 상호작용 특성변수

의사결정주체 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 와의 상호작용을 산출하기 위한 변수로, 시간  $t$ 에서 보행자  $\alpha$ 가 다른 보행자  $\beta$ 를 향하는 벡터  $\vec{n}_{\alpha\beta,t}$  ( $\vec{n}_{\alpha\beta,t} = \vec{x}_{\alpha,t} - \vec{x}_{\beta,t}$ )와 보행자  $\alpha$ , 다른 보행자  $\beta$ 간 거리  $d_{\alpha\beta,t}$  ( $d_{\alpha\beta,t} = |\vec{n}_{\alpha\beta,t}| = |\vec{x}_{\beta,t} - \vec{x}_{\alpha,t}|$ ), 시간  $t$ 에서 의사결정 보행자  $\alpha$ 의 진행방향을 기준으로 다른 보행자  $\beta$ 가 위치한 각도  $\theta_{\alpha\beta,t}$  ( $\vec{n}_{\alpha\beta,t} \cdot \vec{v}_{\alpha,t} = |\vec{n}_{\alpha\beta,t}| |\vec{v}_{\alpha,t}| \cos \theta_{\alpha\beta,t}$ ) 등을 산정하여 보행행태를 분석하였다.



<그림 4-4> 영상자료 분석을 위한 보행특성변수

③ 회피시작 시점  $t_A$ 에서의 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도

회피시작 시점은 장애물이 보행자의 진행방향에 존재하며 보행자의 이동방향 변화량  $\theta_{\alpha,t}$ 이 일반적인 이동방향 변화량(평균)  $\theta_{\alpha,AVG}$ 보다 크게 변하는 경우로 설정하였다. 즉  $\theta_{\alpha,t} > \theta_{\alpha,AVG}$ 일 때, 시간  $t$ 를 회피시작 시점으로 정의하고 이때 이동방향 변화량은  $\theta_{\alpha,t_A}$ 이다.

회피시작 시점에서, 장애물 또는 다른 보행자와의 거리는  $d_{\alpha\beta,t_A} = \left| \vec{n}_{\alpha\beta,t_A} \right|$ 이며, 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도는  $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ 이다.

## 2) 보행이동행태 분석결과

본 연구에서는 보행행태에 영향을 미치는 요인 중 수집이 가능한 장애물과의 거리  $d_{\alpha\beta,t_A}$ , 의사결정자 진행방향을 기준으로 장애물이 위치한 각도  $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ 에 대한 실제 행태를 살펴보았다. 먼저, 두 변수의 기술통계를 살펴보면, 회피시작 시점  $t_A$ 에서 장애물까지 거리의 평균은 3.423m이며, 표준편차는 1.192m로 나타났으며, 장애물이 위치한 각도는 보행자의 진행방향을 기준으로 평균 13.331°로 나타났으며, 표준편차는 6.815°이다(<표 4-15> 참조).

<표 4-15> 회피시작 시점에서 장애물과의 거리, 각도 특성

(단위: m, °)

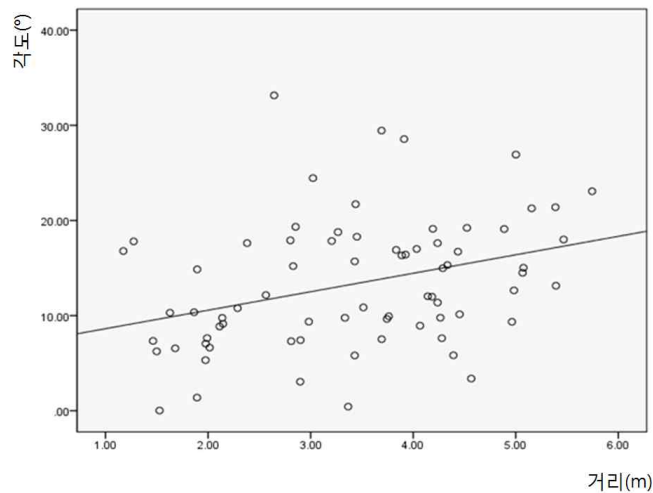
구분	표본크기	최소값	최대값	평균	표준편차
거리( $d_{\alpha\beta,t_A}$ )	73	1.174	5.744	3.423	1.192
각도( $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ )	73	0.020	33.150	13.331	6.815

두 변수간 상관관계를 살펴보면 <표 4-16>, <그림 4-5>와 같이 회피시작 시점에서, 장애물까지 거리와 진행방향을 기준으로 장애물이 위치한 각도는 양(+)의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

<표 4-16> 거리, 각도 간 상관관계

구분		각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )
거리 ( $d_{\alpha\beta, t_A}$ )	Pearson 상관계수	0.340***
	유의확률 (양쪽)	0.003
	표본크기	73

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 90%, 95%, 99% 수준에서 유의함을 의미함.



<그림 4-5> 회피시작 시점에서 거리와 각도 관계

회피시작 시점에서 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 선정한 장애물과의 거리( $d_{\alpha\beta, t_A}$ ), 장애물이 위치한 각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )변수와 의사결정 보행자의 이동방향 변화량( $\theta_{\alpha, t_A}$ )간 상관계수 값은 크지 않지만, 음(-)의 상관관계

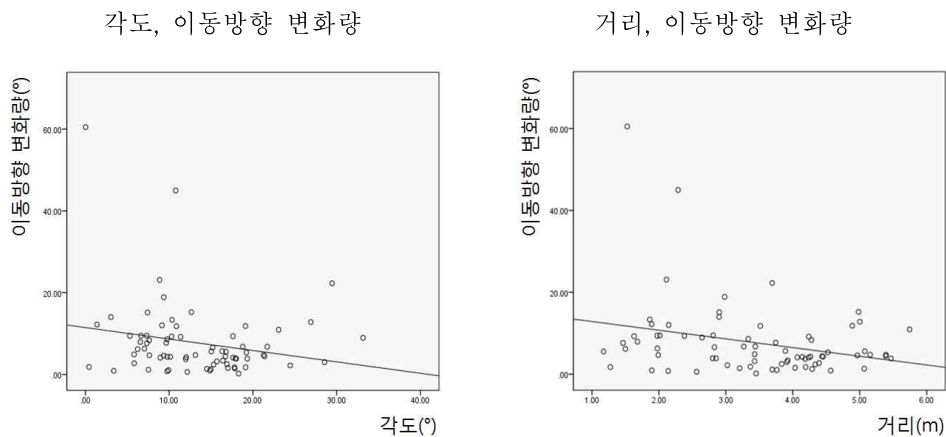


를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 장애물과의 거리가 가까울수록 이동방향 변화율(회피각)은 커지고, 장애물이 위치한 각도 역시, 정면에 장애물이 위치할수록 이동방향 변화율은 큰 것으로 분석되었다(<표 4-17>, <그림 4-6> 참조).

<표 4-17> 요인변수와 회피시작 시점의 이동방향 변화량 간 상관관계

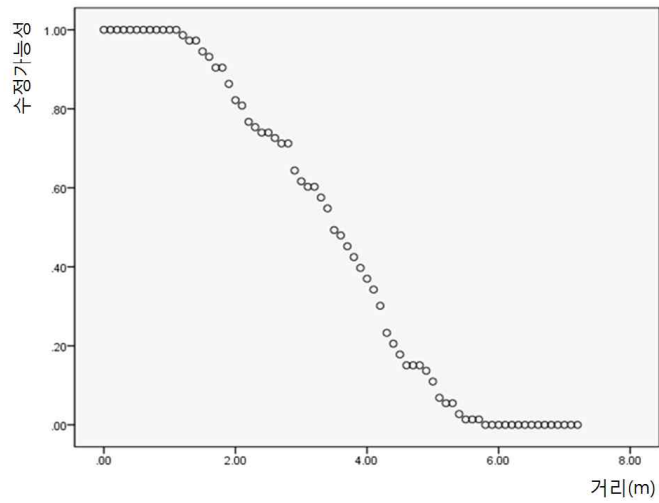
구분		거리 ( $d_{\alpha\beta, t_A}$ )	각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )
이동방향 변화량 ( $\theta_{\alpha, t_A}$ )	Pearson 상관계수	-0.276**	-0.208*
	유의확률 (양쪽)	0.018	0.078
	표본크기	73	73

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 90%, 95%, 99% 수준에서 유의함을 의미함.



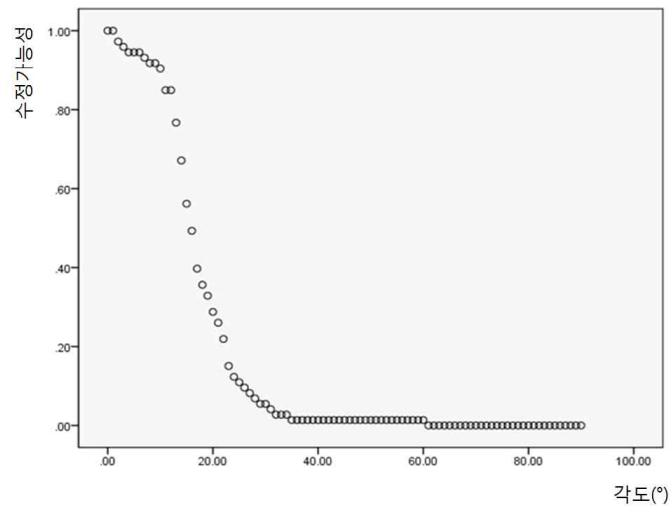
<그림 4-6> 요인변수와 이동방향 변화량 관계

각 변수별 빈도를 살펴보면 <그림 4-7>, <그림 4-8>과 같다. 먼저, 장애물과의 거리가 멀어질수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 낮아지는 형태로 나타났으며, 이는 로지스틱 곡선 형태를 보인다.



<그림 4-7> 장애물까지 거리와 수정가능성 관계

또한 장애물이 보행자 진행방향을 기준으로 정면에 위치할수록 수정가능성은 높은 것으로 나타났다.



<그림 4-8> 장애물이 위치한 각도와 수정가능성 관계

### 3) 소속도 함수 구성

연령, 성별, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 공간의 폭 등 유의미한 변수를 조건부 퍼지변수로 설정하여 소속도 함수를 구축하였다. 영상자료를 통해 추정이 가능한 거리, 각도 변수는 특성분석을 통해 소속도 함수를 구성하였다.

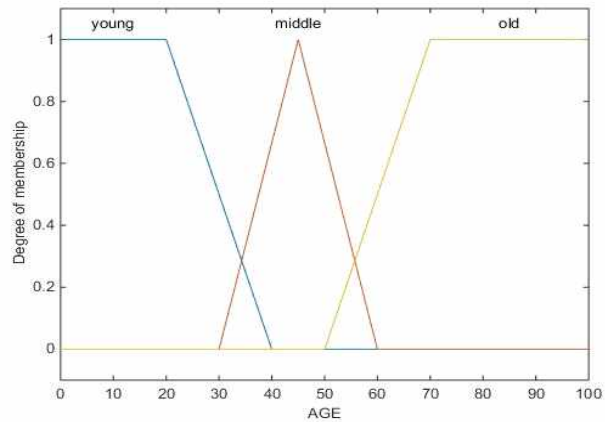
<표 4-18> 퍼지변수 설정

구분	조건부	결론부
보행자 개별특성	연령, 성별*, 통행목적*	보행자의 방향 또는 속도 수정가능성( $A_{k,t}$ )
사회적 환경 요인	장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물 및 다른 보행자가 위치한 각도, 타 보행자와의 상대속도	
물리적 환경 요인	보행공간의 폭	

주: \* 조건부 변수 중 성별, 통행목적은 경계가 명확한 일반집합에 해당한다.

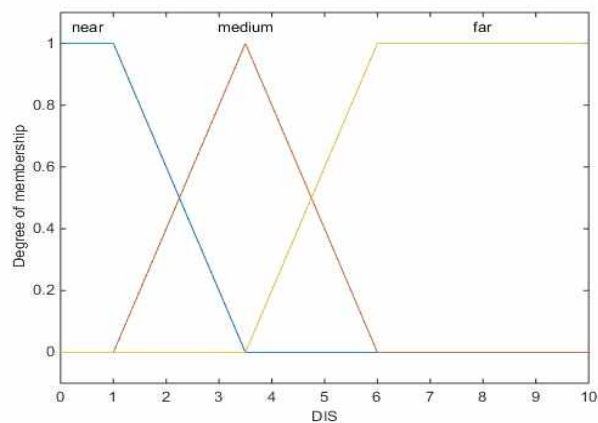
<표 4-19> 연령 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
young	보행자의 나이가 어리다.	trapmf	[0, 0, 20, 40]
middle	보행자의 나이가 보통이다.	trimf	[30, 45, 60]
old	보행자의 나이가 많다.	trapmf	[50, 70, 100, 100]



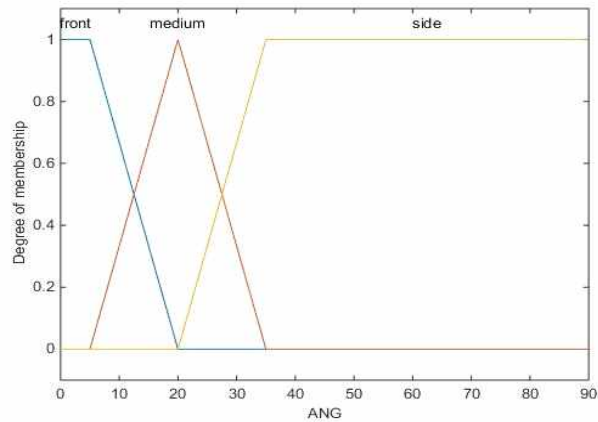
<표 4-20> 장애물과의 거리 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
near	장애물과 거리가 가깝다.	trapmf	[0, 0, 1, 3.5]
medium	장애물과 거리가 보통이다.	trimf	[1, 3.5, 6]
far	장애물과 거리가 멀다.	trapmf	[3.5, 6, 10, 10]



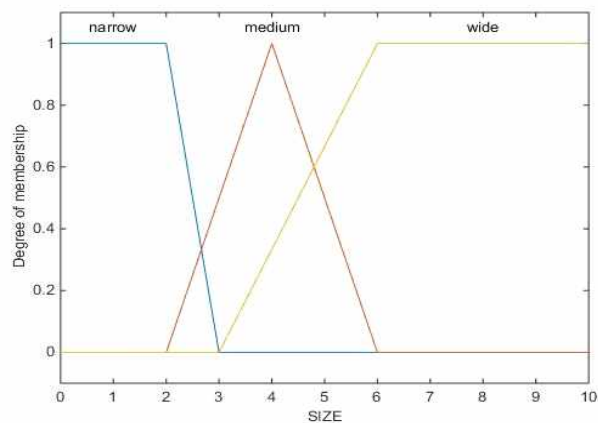
<표 4-21> 장애물이 위치한 각도 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
front	장애물이 정면에 위치하고 있다.	trapmf	[0, 0, 5, 20]
medium	장애물이 중간에 위치하고 있다.	trimf	[5, 20, 35]
side	장애물이 측면에 위치하고 있다.	trapmf	[20, 35, 90, 90]



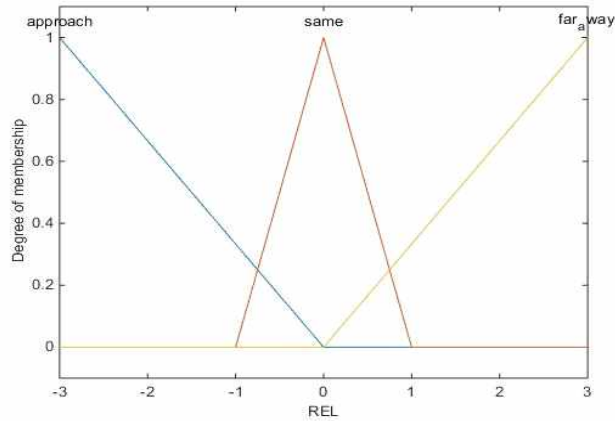
<표 4-22> 보행공간의 폭 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
narrow	보행공간의 폭이 좁다.	trapmf	[0, 0, 2, 3]
medium	보행공간의 폭이 보통이다.	trimf	[2, 4, 6]
wide	보행공간의 폭이 넓다.	trapmf	[3, 6, 10, 10]



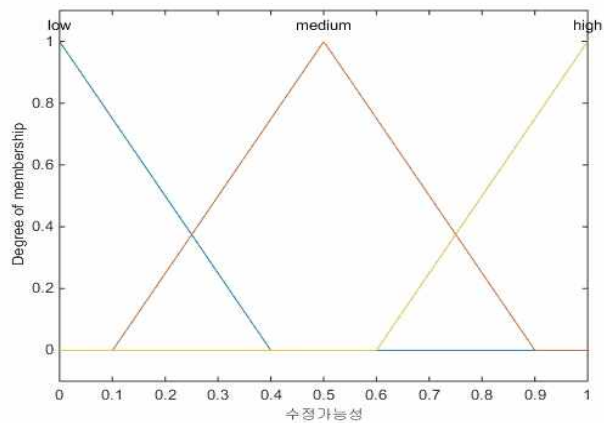
<표 4-23> 상대속도 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
approach	다른 보행자가 다가온다.	trimf	$[-3, -3, 0]$
same	동일한 속도로 이동한다.	trimf	$[-1, 0, 1]$
far away	다른 보행자가 멀어진다.	trimf	$[0, 3, 3]$



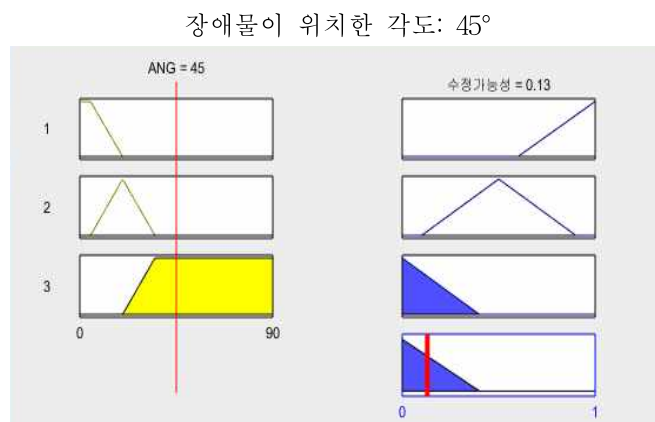
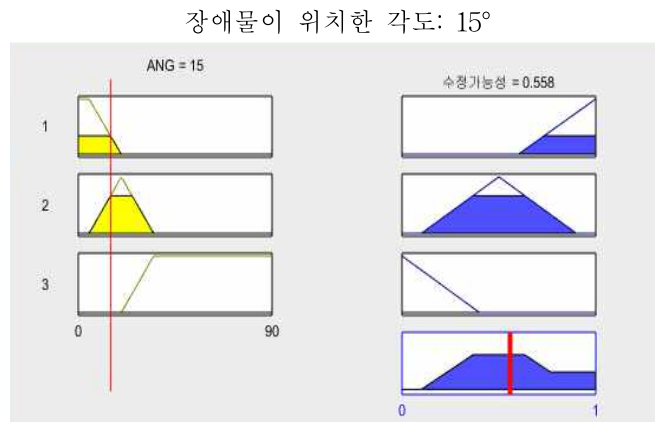
<표 4-24> 보행자 방향 또는 속도 수정가능성 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
low	방향 또는 속도 수정가능성이 낮다.	trimf	$[0, 0, 0.4]$
medium	방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다.	trimf	$[0.1, 0.5, 0.9]$
high	방향 또는 속도 수정가능성이 높다.	trimf	$[0.6, 1, 1]$



### 3. 퍼지연산 및 비퍼지화

퍼지연산은 Mamdani 형식을 적용하고 비퍼지화는 무게중심법을 이용하여 산출하였다. 일반적으로 Mamdani 추론법은 무게중심법을 주로 사용하여 비퍼지값을 산출한다(채석·오영석, 1995). 장애물이 위치한 각도에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정을 살펴보면 <그림 4-9>와 같다.



<그림 4-9> 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성 도출과정

예를 들어 장애물이 보행자의 정면을 기준으로 15°에 위치한 경우, 이때 15°는 장애물이 위치한 각도 변수의 front(정면) 집합과 medium(정면과 측면의 중간) 집합에 속한다. 장애물이 정면에 위치하면 수정가능성이 높고, 장애물이 정면과 측면 중간에 위치하면 수정가능성이 보통이다. Mamdani 형식의 퍼지연산과 무게중심법을 통해 산출한 비퍼지값은 0.558로 산출된다. 동일한 방식으로 장애물이 보행자 정면을 기준으로 45°에 위치하면 수정가능성은 0.130으로 감소한다.

#### 4. 가중치 적용

퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 각 변수의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하며, 여기서 수정가능성 값은 비퍼지값으로 표현된다. 또한 각 변수의 가중치를 적용하여 보행자의 최종 방향 또는 속도 수정가능성을 산정한다. 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 최종 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  값은 [식 4-3]과 같이 표현된다.

$$A_{k,t} = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot y_k^{*,j} \quad [\text{식 4-3}]$$

여기서,

$y_k^{*,j}$  : 요인  $j$ 의 퍼지추론을 통해 산출된 비퍼지값

$N$  : 요인의 개수

$\omega_j$  : 변수  $j$ 의 가중치

변수  $j$ 의 가중치  $\omega_j$ 는 [식 4-4]와 같이 표현되며, 로짓모형에서 추정된 표준화 계수를 기반으로 한다.



$$w_j = \frac{Z_j}{\sum_i^N |Z_i|} \quad [\text{식 4-4}]$$

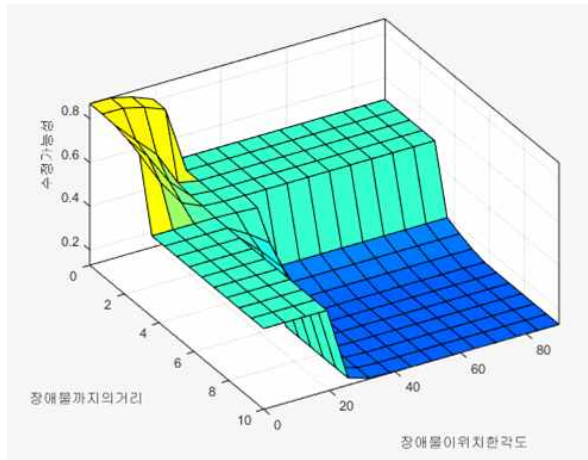
여기서,

$Z_i$  : 변수  $i$ 의 표준화 계수(standardized estimate)

<표 4-25> 변수의 가중치 설정

변수	표준화 계수	변수의 가중치
연령	-0.250	0.122
성별	0.124	0.060
목적	0.085	0.041
거리	0.673	0.327
각도	0.214	0.104
상대속도	0.570	0.277
폭	0.142	0.069

어떠한 설명변수가 방향 또는 속도 수정가능성에 더 많은 영향을 주는 지 살펴보기 위해 유의미한 변수를 대상으로 표준화 계수를 추정하고 변수간 가중치  $w_j$ 를 산정하였다. 중요도를 살펴보면, 장애물과의 거리가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났고, 상대속도, 연령, 장애물이 위치한 각도, 보행공간의 폭, 성별, 보행목적 순으로 중요도가 산출되었다. 다른 조건이 동일한 경우, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도에 따른 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  변화는 <그림 4-10>과 같은 형태를 보인다.



<그림 4-10> 조건부 속성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성

## 제 5 장 모형 구현 및 검증

### 제 1 절 검증방법론

모형의 검증(validation)은 모형이 실제현상을 제대로 설명하고 있는지를 판단하는 과정으로, 본 연구의 검증은 현장조사에서 수집한 자료와 의사결정을 고려한 보행이동행태모형 간의 비교, 분석을 수행한다. 보행행태는 개별특성에 따라 다양하고, 여러 요인이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이를 모형화하는 것 뿐 아니라, 모형에 대한 검증 또한 쉽지 않다. 특히 개별보행자 단위 미시적 행태의 검증은 개인의 특성, 의사결정에 영향을 미치는 요인에 대한 실측자료가 존재하여야 하는데, 이를 수집하기는 현실적으로 불가능하다.

이에 일반적으로 미시적 행태 모형의 검증에는 개별행태가 집계되어 형성되는 거시적 특성이 주로 이용된다. 즉, 개별행태모형을 통해 집계된 거시적 특성이 실제 관측자료와 통계적으로 또는 시각적으로 차이가 크지 않다는 사실로 모형의 설명력을 판단하는 경우가 대다수이다(이종호, 2008).

본 연구에서 개발된 보행이동행태모형의 검증은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 5분 단위로 집계된 거시적 보행교통류 특성을 대상으로 관측자료와 본 모형의 추정결과를 비교한다. 즉, 개별보행자의 의사결정과정을 통해 집계된 거시적 관점의 속도, 밀도, 보행량 특성을 도출하여 검증에 활용하는 것이다. 둘째, 관측자료와 본 모형의 개별보행자 단위의 행태를 비교한다. 개별보행자 행태의 검증은 영향요인에 대한 자료수집이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 개별보행자 단위의 궤적정보를 추출하여 모형과 관측자료간 속도 분포와 이동방향 변화량 분포의 차이를 살펴본다.

<표 5-1> 모형의 검증 대상

구분	내용
거시적 특성 : 5분 단위 집계자료	보행교통류율, 속도, 밀도
미시적 특성 : 개별보행자 궤적	1초 단위 개별보행자의 보행속도, 이동방향 변화량

관측자료와 본 모형의 결과 비교를 위해, 먼저 관측자료는 유동인구 영상촬영자료를 통해 거시적 보행교통류 특성과 개별보행자 단위의 속도, 이동방향 변화량을 추출하였다. 본 모형의 추정결과는 3, 4장에서 개발된 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 시뮬레이션 결과를 이용하여 거시적 특성과 개별행태 특성을 산출하였다.

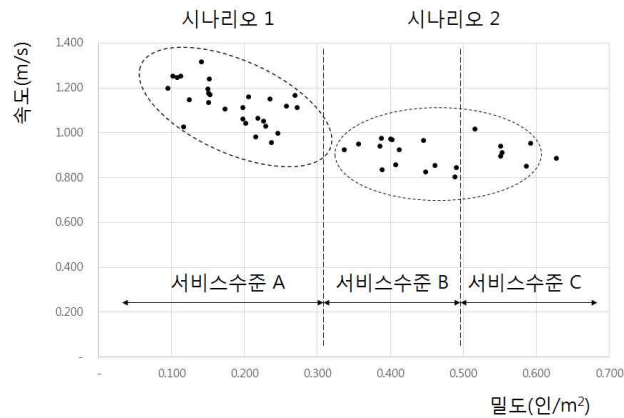
## 1. 분석시나리오

영상촬영자료 중 보행량이 많은 상위 4시간 (12:00~13:00, 16:00~18:00, 19:00~20:00)의 관측자료를 시간단위로 구분하고, 5분 단위 집계자료를 이용하여 서비스수준을 산정하면 <표 5-2>와 같다. 도로용량편람에서 제시하는 보행자도로 서비스수준의 효과척도는 보행교통류율, 점유공간, 밀도, 속도 등을 사용하고 있다. 시간대 12:00~13:00, 14:00~17:00의 경우는 효과척도가 밀도일 경우 서비스수준이 A로 분석되었고, 17:00~18:00, 19:00~20:00 시간대의 서비스수준은 B이하로 산정되었다.

<표 5-2> 5분 단위 관측자료의 보행교통류 특성 및 서비스수준

구분	시간대	보행교통류율(인/분/m)	밀도(인/m <sup>2</sup> )	속도(m/s)
1	12:00~12:59	7.98 (A)	0.13 (A)	1.20 (C)
2	16:00~16:59	12.40 (A)	0.22 (A)	1.10 (D)
3	17:00~17:59	16.89 (A)	0.36 (B)	0.97 (E)
4	19:00~19:55	20.62 (B)	0.51 (C)	0.87 (E)

주: ( )은 해당 효과척도를 기준으로 산출한 서비스수준을 의미한다.



<그림 5-1> 관측자료의 속도-밀도 관계

<그림 5-1>은 관측자료의 속도-밀도 관계를 보여준다. 밀도에 따라 대상지역의 보행교통류는 명확한 경계를 가지고 구분되는 것으로 나타났으며, 보행밀도를 효과척도로 한 보행자도로 서비스수준과 유사한 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 관측자료를 밀도수준에 따라 밀도가 낮은 상황, 밀도가 다소 높은 상황으로 구분하여 <표 5-3>과 같이 시나리오를 설정하고, 시나리오별 관측자료과 모형추정결과 간의 검증을 수행하였다. 시나리오 1은 시간대 12:00~13:00, 16:00~17:00로 밀도가 낮은 보행소통상황이며, 보행밀도를 기준으로 서비스수준이 A이다. 반면, 시나리오 2는 시간대 17:00~18:00, 19:00~20:00이며, 밀도가 다소 높은

상황으로 서비스수준 B이하에 해당한다.

<표 5-3> 분석시나리오 설정

구분	내용
시나리오 1	서비스수준 A이상 밀도가 낮은 보행소통상황
시나리오 2	서비스수준 B이하 밀도가 다소 높은 보행소통상황

## 2. 평가지표

### 1) 거시적 보행교통류 특성

거시적 보행교통류 특성인 속도-밀도-보행교통류율의 검증을 위해, 평가지표는 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE), Theil의 부등계수를 대상으로 하였다. 일반적으로 모형의 평균 예측 오차를 측정하는 지표로 MAE, RMSE가 사용된다. 두 지표는 양(+)의 오차와 음(-)의 오차가 서로 상쇄되는 문제를 피하기 위해 사용되며, RMSE는 상대적으로 개별 오차의 크기가 클 경우, 이를 더 크게 가중시키는 경향이 있다. 각 평가지표는 [식 5-1], [식 5-2]와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad [\text{식 5-1}]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|x_i - \hat{x}_i|) \quad [\text{식 5-2}]$$

여기서,

$x_i$ : 현장조사자료

$\hat{x}_i$ : 시뮬레이션을 통해 도출되는 보행류 특성(속도, 밀도)

$n$ : 전체 자료의 개수

또한 Theil의 부등계수는 예측치가 관측치를 얼마나 잘 설명하는지 나타내는 척도로 [식 5-3]과 같이 표시된다.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i)^2}} \quad [\text{식 5-3}]$$

$U$ 의 분자부분은 RMSE와 동일하지만 이를 스케일링함으로써 부등계수는 항상 0~1사이의 값을 갖는다. 예를 들어  $U$ 값이 0이라면 예측치와 관측치가 완벽히 일치함을 의미하며, 반대로 1인 경우에는 모형이 전혀 예측력을 갖지 않음을 의미한다.

## 2) 미시적 개별행태

궤적자료를 기반으로 한 보행자의 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 대상으로 관측자료와 모형추정 결과를 비교하였다. 분포의 동일성 검정은  $\chi^2$  검정을 활용하였으며, 검정의 가설은 다음과 같이 설정된다.

귀무가설( $H_0$ ): 모형추정값은 관측값을 따르고 있다.

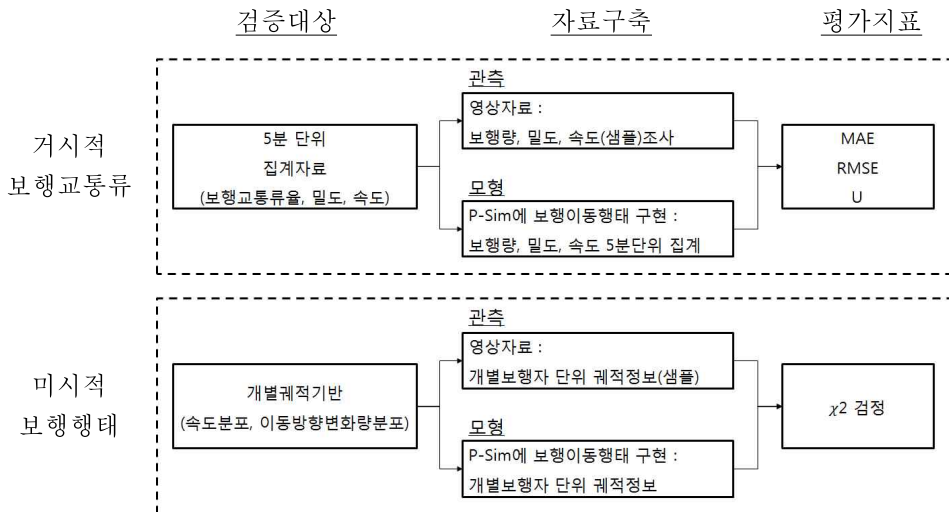
대립가설( $H_1$ ): 모형추정값은 관측값을 따르지 않는다.

$\chi_0^2$  값은 [식 5-4]와 같이 표현되며,  $\chi^2(df, \alpha)$ 는 유의수준  $\alpha$ , 자유도  $df$ 의 임계값으로,  $\chi_0^2 < \chi^2(df, \alpha)$ 이면 귀무가설을 채택하고 모형추정값은 관측값을 따르고 있는 것으로 해석되며,  $\chi_0^2 > \chi^2(df, \alpha)$ 이면 귀무가설을 기각하고 모형추정값은 관측값을 따르지 않는다고 할 수 있다.

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{x_i} \quad [\text{식 5-4}]$$

여기서,  $x_i$ 는 관측값,  $\hat{x}_i$ 는 모형추정값,  $k$ 는 계급의 개수를 나타낸다.

본 연구의 검증방법론은 <그림 5-2>로 요약될 수 있다.



<그림 5-2> 검증방법론



## 제 2 절 자료 구축

### 1. 관측 자료

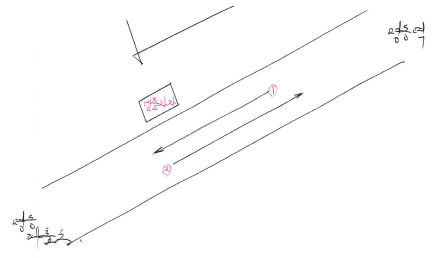
관측자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 서울시 중구 애플라자 앞을 대상지점으로 선정하였다. 유동인구조사는 지점별, 시간대별, 토지유형별 유동인구의 변동특성을 파악하여 보행의 대한 이해도를 높이는 것을 목적으로, 2009년, 2012년, 2013년 3년간 조사되었다(서울특별시, 2014b). 유동인구 영상촬영조사는 주거지역과 상업지역을 주요 대상으로 하며, 토지이용별 보행량이 높은 지점을 위주로 선정하여 강남역, 종각역 등 총 10개 지점을 대상으로 수행하였다(서울특별시, 2013). 본 연구는 명동 애플라자 앞을 대상지역으로 선정하였는데, 해당 지역은 중구 명동 2가 중심상업지역으로 보행량이 많은 지역에 속하며, 차량통행이 제한되어 있어 보행행태 자료를 취득하기 용이하다. 또한 가로수 등 장애물이 없어 영상자료를 통한 보행행태자료(위치, 궤적 등) 추출이 가능하다. 영상촬영자료의 시, 공간적 범위와 자료수집방법은 <표 5-4>와 같다.

<표 5-4> 유동인구 영상촬영조사의 시, 공간적 범위

구분	내용
공간적 범위	서울시 중구 애플라자 앞
시간적 범위	2012년 10월 12일(금) 12:00~20:00
자료수집방법	촬영조사(촬영범위는 횡단거리 14m, 보도폭 9m로 구성)



대상지역 위치



조사개요도



영상자료

<그림 5-3> 영상조사지점도

## 1) 거시적 보행교통류 특성

영상촬영자료 중 보행량이 많은 시간대(12:00~13:00, 16:00~18:00, 19:00~20:00)를 분석대상으로 설정하였다. 보행교통류율과 속도, 밀도 간 상관관계를 살펴보기 위하여 5분 단위의 속도, 밀도, 보행교통류율을 조사하고 검증에 활용하였다. 조사내용은 <표 5-5>와 같다.

<표 5-5> 유동인구 영상자료 조사내용

구분		조사내용
공간	촬영구간 유효보도폭 장애물	횡단거리 14m, 보도폭 9m 12:00~17:00: 9m, 17:00~19:00: 6.9m 17시 이후(6.9m, 수레)
보행량		5분 단위 보행량
보행교통류율		5분 보행량을 1분 단위로 환산하여 보행자가 실제로 보행할 수 있는 유효보도폭으로 나누어 산정
밀도		1분 단위
속도	성별	남: 364명, 여: 411명 (775명 샘플조사)
	출발시각	-
	도착시각	-
	통과시간	평균: 14초
	통행방향	(명동→명동파출소: 453명), (명동파출소→명동: 322명)
개별보행자 궤적		1초 단위 개별보행자의 속도, 이동방향 변화량(샘플조사)

보행교통류율  $V_p$ 은 [식 5-5]와 같이 5분 보행량을 1분 단위로 환산하여 보행자가 실제로 보행할 수 있는 유효보도폭으로 나누어 산정하였다.

$$V_p = \frac{V_5}{5 W_E} \quad \text{[식 5-5]}$$

여기서,

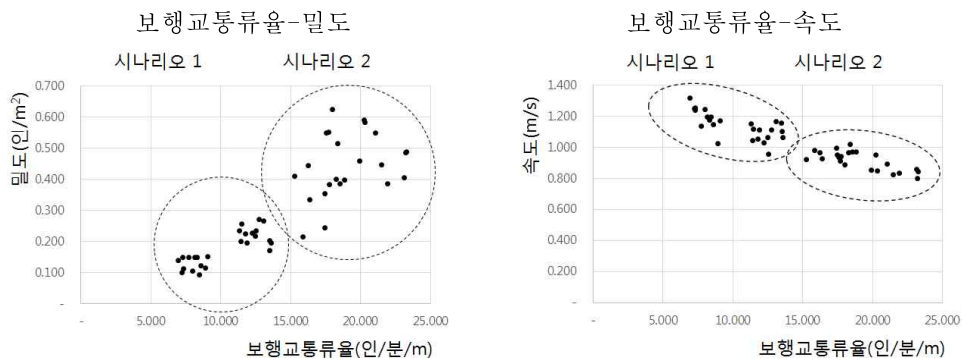
$V_p$  : 보행교통류율(인/분/m)

$V_5$  : 5분 보행교통량

$W_E$  : 유효보도폭(m)

먼저, 관측자료의 거시적 보행교통류 특성을 살펴보면 <표 5-6>과 같

다. 명동 애플라자 앞 보행공간의 보행속도 평균은 1.03m/s로 기존 연구의 평균 보행속도<sup>27)</sup>와는 다소 차이가 있다. 분석대상지가 중심상권지역이고, 조사시간대가 오후시간으로, 이동을 주 목적으로 하기 보다는 쇼핑, 관광 등 비업무 통행이 다수 포함되어 있기 때문으로 보행속도는 다소 낮은 것으로 판단된다. 시나리오별로 구분하면, 평균 보행교통류율이 10.19인/분/m인 시나리오 1의 평균속도는 1.15m/s로 조사되었으며, 표준편차는 0.08m/s이다. 반면 밀도가 높은 시나리오 2의 속도 평균은 0.92m/s로 나타났고 표준편차는 0.06m/s로 시나리오 1에 비해 표준편차는 다소 작다. 밀도의 경우 시나리오 1의 평균은 0.18인/m<sup>2</sup>이며, 시나리오 2는 0.44인/m<sup>2</sup>이다. 분석시나리오별 거시적 보행교통류 특성은 <그림 5-4>와 같다.



<그림 5-4> 시나리오별 거시적 보행교통류 특성

관측자료의 평균 보행속도는 낮지만 정규성 검정 결과, 속도분포는 정규분포를 따르는 것으로 나타났다. Shapiro-Wilk test<sup>28)</sup>결과 P-value가

27) Daamen (2004)에서 기존 연구 검토를 통한 평균 보행속도는 1.34m/s였으며, 국토교통부(2011b)에서 일반 보행통로 평균 보행속도는 1.33m/s로 조사되었다.

28) 정규성 검정을 위한 Shapiro-Wilk test에서 귀무가설( $H_0$ )은 '보행속도가 정규분포를 따른다'이며, 대립가설( $H_1$ )은 '보행속도가 정규분포를 따르지 않

0.160으로 귀무가설( $H_0$ : 보행속도는 정규분포를 이룬다.)을 기각할 수 없으므로, 정규분포를 만족한다고 할 수 있다. 분석시나리오별 보행속도의 정규성을 살펴본 결과, 두 시나리오 모두 보행속도는 정규분포를 따르는 것으로 나타났다(<표 5-7> 참조).

**<표 5-6> 관측자료의 거시적 보행교통류 특성**

구분		표본크기	최소값	최대값	평균	표준편차
시나리오 1	보행교통류율 (인/분/m)	24	6.93	13.58	10.19	2.38
	밀도(인/m <sup>2</sup> )	24	0.10	0.27	0.18	0.06
	속도(m/s)	24	1.03	1.32	1.15	0.08
시나리오 2	보행교통류율 (인/분/m)	24	12.51	23.25	18.75	2.70
	밀도(인/m <sup>2</sup> )	24	0.22	0.63	0.44	0.11
	속도(m/s)	24	0.80	1.02	0.92	0.06
전체	보행교통류율 (인/분/m)	48	6.93	23.25	14.47	5.01
	밀도 (인/m <sup>2</sup> )	48	0.10	0.63	0.31	0.16
	속도 (m/s)	48	0.80	1.32	1.03	0.14

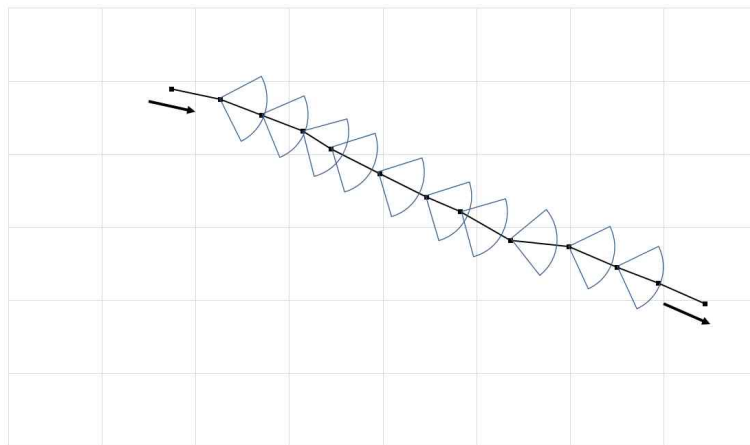
**<표 5-7> 시나리오별 보행속도 분포의 정규성 검정**

구분	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의확률	통계량	자유도	유의확률
시나리오 1	0.101	24	0.200	0.966	24	0.569
시나리오 2	0.140	24	0.200	0.947	24	0.238
전체	0.109	48	0.200	0.965	48	0.160

는다'로 설정된다.

## 2) 개별행태 특성

개별보행자 단위의 미시적 행태에 영향을 미치는 모든 요인을 수집하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 제한적이거나 개별행태의 관측자료를 기반으로 모형과의 비교를 하고자 한다. 이를 위해 Matlab을 활용하여 유동인구 영상촬영자료의 개별보행자 단위 궤적정보를 추출하였다.<sup>29)</sup> 분석시나리오별로 개별보행자 궤적샘플을 추출하고 이상치를 제거한 후, 개별보행자의 1초 단위 속도, 이동방향 변화량을 산출하였다. 개별보행자 단위 궤적은 <그림 5-5>와 같이 추출된다.



<그림 5-5> 개별보행자 궤적

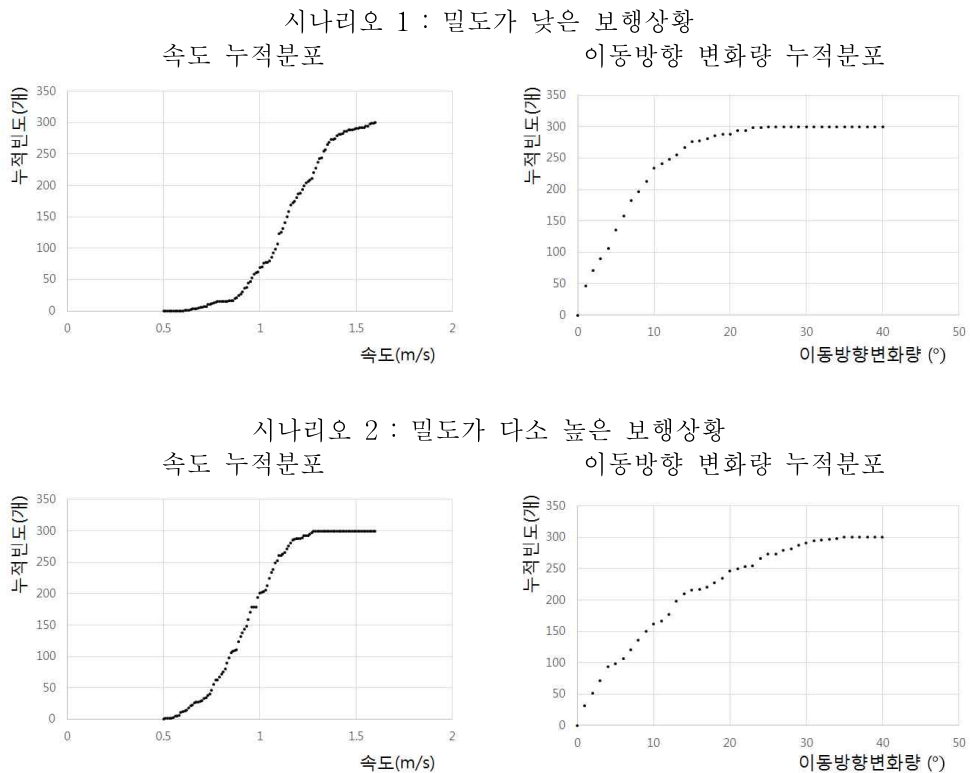
밀도에 따른 시나리오 1과 시나리오 2를 대상으로 영상촬영자료를 분석하여 개별보행궤적 자료를 추출하였다. 시나리오별 각 30명의 궤적을 추출하고, 속도, 이동방향 변화량 자료를 대상으로 이상치를 제거한 개별보행자의 속도, 이동방향 변화량 평균은 <표 5-8>과 같다. 밀도가 낮은 시나리오 1의 경우, 1초 단위 궤적정보를 대상으로 평균 속도는 1.14m/s,

29) 영상에서 이동하는 물체의 궤적 추출은 Matlab의 Motion-Based Multiple Object Tracking을 활용하였다(관련 내용은 본 논문 pp. 90~91을 참조).

이동방향 변화량은  $6.72^{\circ}$ 로 나타났다. 반면 시나리오 2는 평균 속도  $0.92\text{m/s}$ , 이동방향 변화량  $11.03^{\circ}$ 로 밀도가 낮은 시나리오 1에 비해 속도가 낮고 이동방향 변화량은 큰 것으로 조사되었다. 시나리오별 속도와 이동방향 변화량의 누적분포는 <그림 5-6>과 같다.

<표 5-8> 관측자료의 미시적 개별행태 특성

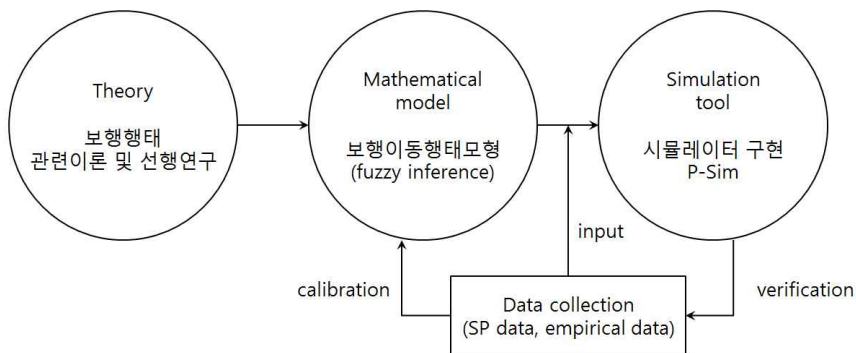
구분	표본크기	평균 속도(m/s)	평균이동방향 변화량( $^{\circ}$ )
시나리오 1	300	1.14	6.72
시나리오 2	300	0.92	11.03



<그림 5-6> 관측자료의 개별행태 특성

## 2. 모형추정 자료

본 모형의 추정결과는 3, 4장에서 개발된 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 시뮬레이터 결과를 활용하여 거시적 보행특성과 개별행태 특성을 산출하였다. 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하는 단계는 <그림 5-7>과 같고, 시뮬레이션의 전반적 단계는 크게 관련이론 및 선행연구 검토(2장), 보행이동행태모형 개발(3장), 모형의 정산(4장), 시뮬레이터 구현(5장)으로 구성된다.



<그림 5-7> 시뮬레이션 단계

본 연구에서 개발한 보행이동행태모형의 구현에 앞서, P-Sim의 개념 및 주요 모듈을 간략히 살펴보았다. P-Sim은 객체지향 프로그래밍을 기반으로 하며, 보행공간의 미시적 평가가 가능한 보행자 시뮬레이터이다.<sup>30)</sup>

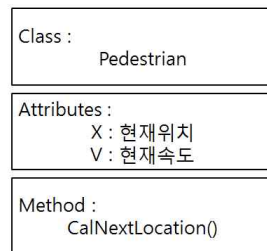
### ① 객체지향 프로그래밍

보행자는 자율성을 가지고 주변 물리적·사회적 환경과의 상호작용을

30) 이용미(2009), 한명주 외(2010), 국토교통부(2011b)를 참조.



통해 의사결정을 수행한다. 따라서 Microsoft의 Visual C++ 이용한 객체지향 프로그래밍을 활용하여 보행이동행태모형을 구현하였다. 객체지향 프로그래밍은 구현하고자 하는 환경의 구성요소들을 동질적인 특징과 기능을 수행하는 각각의 객체로 구분하여 특정한 사건이 발생할 때마다 이에 반응하여 시뮬레이션이 진행되는 방식이다.

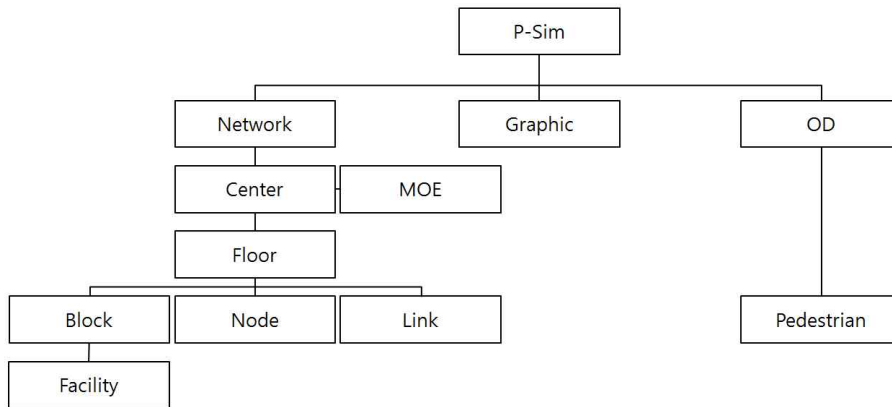


<그림 5-8> P-Sim의 객체지향 프로그래밍 기본 구성요소

객체지향 프로그래밍의 기본 구성요소는 클래스(class), 객체(object), 메서드(method)로 구분되는데, 먼저, 클래스는 같은 종류(또는 문제 해결을 위한)의 집단에 속하는 속성과 행위를 정의한 것이다. 객체지향 프로그램의 기본적인 사용자 정의 데이터형(user define data type)이라고 할 수 있으며, 다른 클래스 또는 외부 요소와 독립적으로 디자인하여야 한다. P-Sim의 클래스는 보행공간의 특성을 분류(네트워크 토폴로지)하는 클래스와 보행자 클래스 등으로 구분된다. 둘째, 객체는 클래스의 인스턴스(실제로 메모리상에 할당된 것)로, 자신 고유의 속성을 가지며 클래스에서 정의한 행위를 수행할 수 있다. P-Sim에서 보행자 클래스의 객체는 보행자를 나타내며, 주어진 환경에서 독자적 의사결정을 수행하여 이동하는 행태를 가진다. 마지막으로 메서드는 클래스로부터 생성된 객체를 사용하는 방법으로써 객체에 명령을 내리는 메시지로, 일종의 함수로 구성되어 있다.

P-Sim에서 정의된 주요 클래스로는 <그림 5-9>와 같이 보행공간 분석을 위한 네트워크(Network), 건물(Center), 층(Floor), 블록(Block), 노

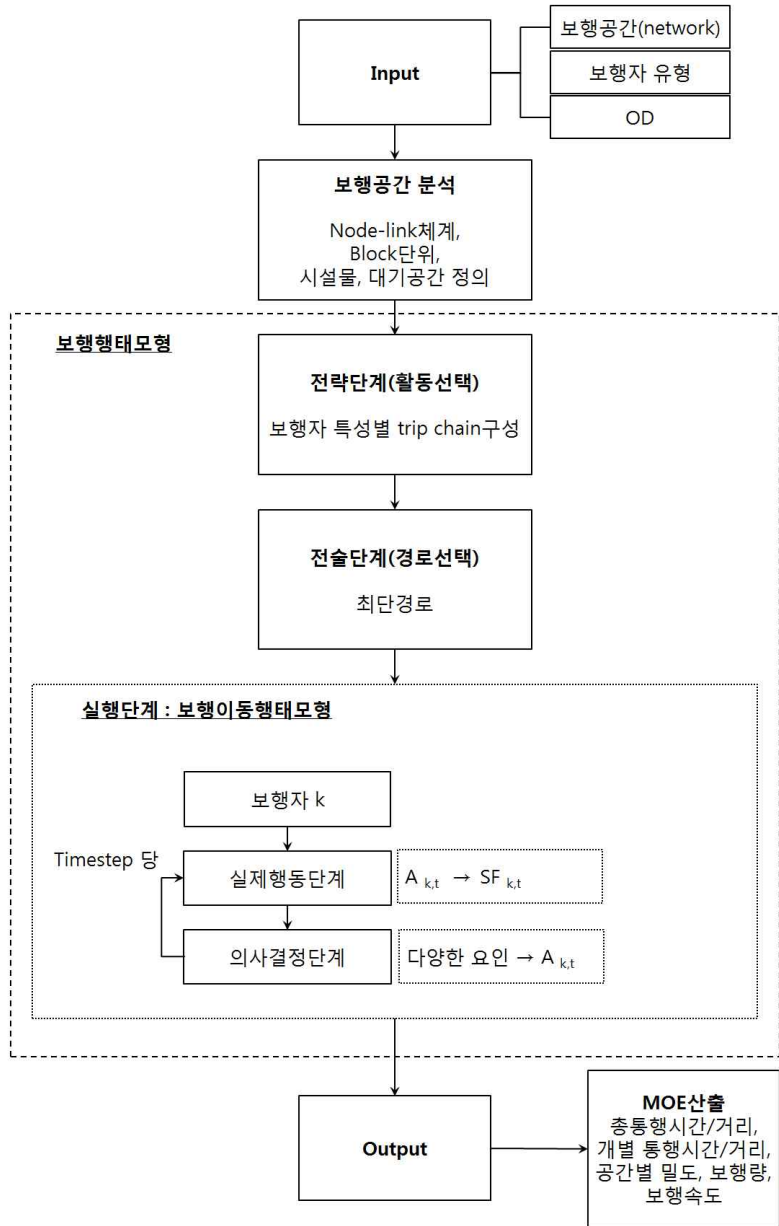
드-링크(Node-link) 클래스 등과 시뮬레이터의 그래픽을 담당하는 그래픽(Graphic) 클래스, 그리고 실제 보행자를 생성, 소멸시키고 관리하는 OD 클래스로 구분된다. 보행자의 의사결정 및 행태를 구현하는 클래스는 보행자(Pedestrian) 클래스로 보행자의 개별특성을 정의하고, 인지, 의사결정, 행동 등의 행태를 메서드로 구성하여 보행이동행태를 구현하였다. 각 클래스는 객체와 객체 간의 관계를 통해 모델링되며, MOE 클래스는 보행자, 시설물 및 시뮬레이터의 총 효과척도를 산출한다.



<그림 5-9> P-Sim의 클래스 위계

## ② P-Sim의 구조

P-Sim은 크게 입력단계, 보행행태 분석을 위한 보행공간 분석단계, 보행행태단계로 구분되며 구조는 <그림 5-10>과 같다. 본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당한다.



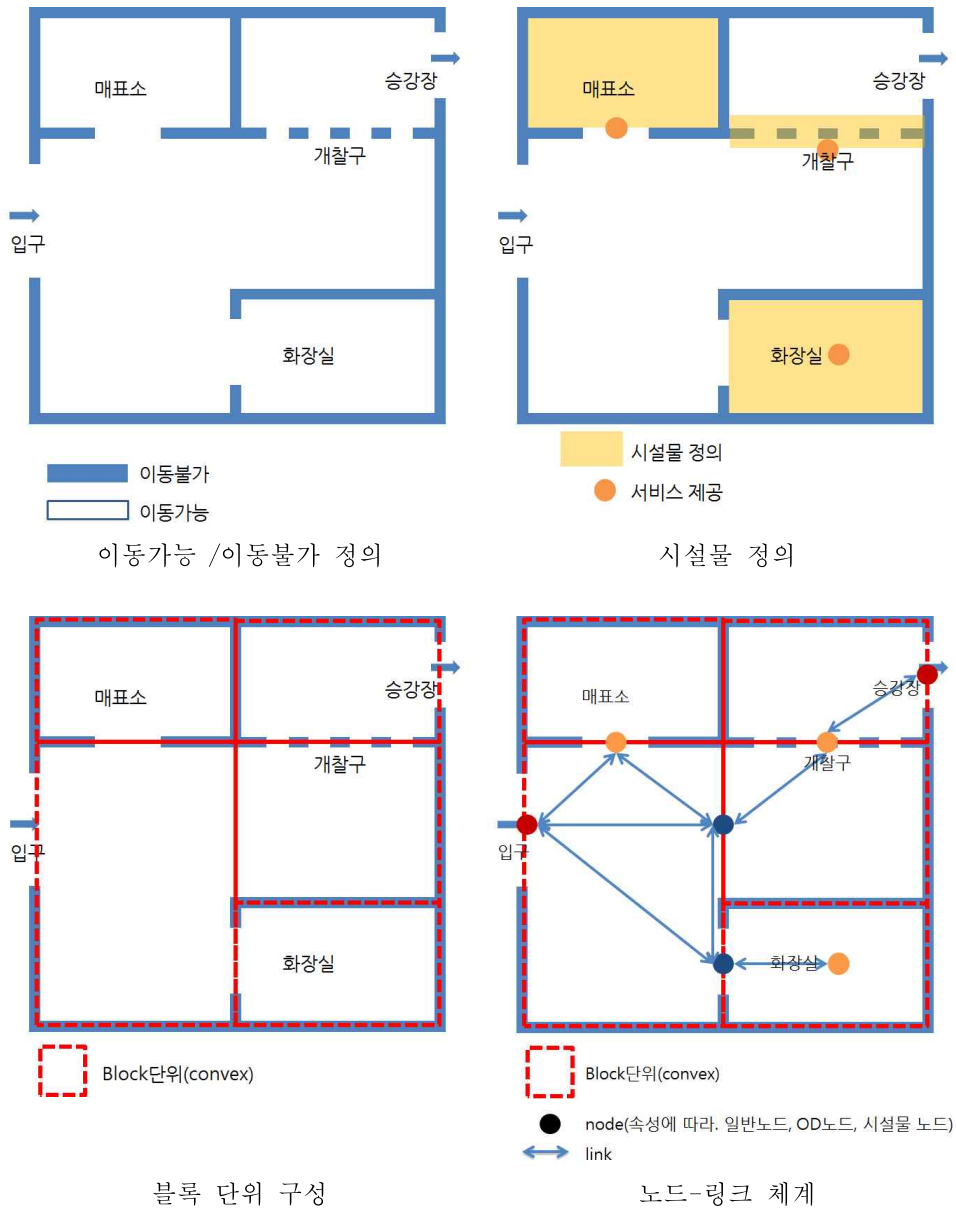
<그림 5-10> 시물레이션 구조도

### ③ P-Sim의 주요 모듈

P-Sim의 주요 모듈은 크게 입력 모듈, 보행공간 정의, 보행행태모형, 출력 모듈로 구분된다. 보행행태모형은 앞서 살펴본 바와 같이 전략, 전술, 실행단계로 분류되며 본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당된다.

먼저 입력 모듈에서는 보행공간과 관련된 속성정보, 보행자 OD, 보행자 유형에 대한 자료를 입력한다. 또한 보행행태를 구현하기 위하여, 보행자 공간에 대한 정의가 필요하다. P-Sim은 CAD 도면을 기반으로 이동가능/불가 구역과 보행공간 내 다양한 시설물을 정의한다. 보행가능한 공간은 convex한 블록 단위로 구분하고, 이를 노드-링크 체계로 구축하여 경로선택이나 활동선택 과정을 구현할 수 있도록 하였다. 보행공간은 크게 보행자 이동공간(보도 및 환승통로 등), 보행활동시설(매표소, 화장실 등), 보행자 생성/소멸시설(출입구, 플랫폼 등)등으로 구분할 수 있다.

전략단계에서 보행자 OD(보행공간의 진입, 출입 지점)는 미리 가정하였으며, 보행공간에서 중간목적지(활동)를 선택하는 과정은 보행목적에 따라, 보행공간의 특성에 따라 다양하게 나타날 수 있다. P-Sim은 보행목적별로 중간목적지 설문조사를 수행하여, 개별특성을 반영한 활동 OD(activity에서 파생된 trip)를 구축하였다. 보행자의 특성(이용시간대, 나이, 성별, 이용수단 등)별 카테고리를 구분하여 확률배분에 의해 활동을 선택할 수 있도록 하였다.



<그림 5-11> P-Sim의 보행공간 정의

전술단계는 경로선택 과정을 대상으로 하며, 보행공간에서 보행자가 경로를 선택하는 데에는 주관적인 판단이 작용하기 때문에 보행자의 통

행목적, 통행특성 등 다양한 측면에서의 연구가 필요하다. P-Sim에서 보행자의 이동경로 선택행태는 최단경로선택을 원칙으로 하며, 최단경로는 크게 최단거리, 공간구문론을 통한 최대인지경로로 설정된다. 경로는 앞서 정의된 노드-링크 체계를 이용하여 산출되며, 보행자는 보행공간에서 최단경로를 선호한다는 기존 연구와 크게 다르지 않다.<sup>31)</sup>

실행단계는 개별보행자를 대상으로 단위시간당 방향 또는 속도를 선택하는 과정으로 미시적 환경조건에서 보행자와의 상호작용을 고려한다. 3, 4장에서 개발된 퍼지추론을 적용한 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하였다.

또한 P-Sim은 보행자들이 시설물을 이용하는 일련의 과정을 모형화하였다. 먼저, 보행공간내의 시설물들을 대기행태, 서비스행태에 따라 분류하였다. 서비스를 제공하는 시설물의 주요 요소는 대기과 서비스이다. 시설물 이용자에 비해 서비스 창구가 적으면 대기행렬이 발생하게 되고, 대기행렬 내의 사람들은 진입 순서대로 서비스를 받게 된다.

#### ④ 효과척도 산출

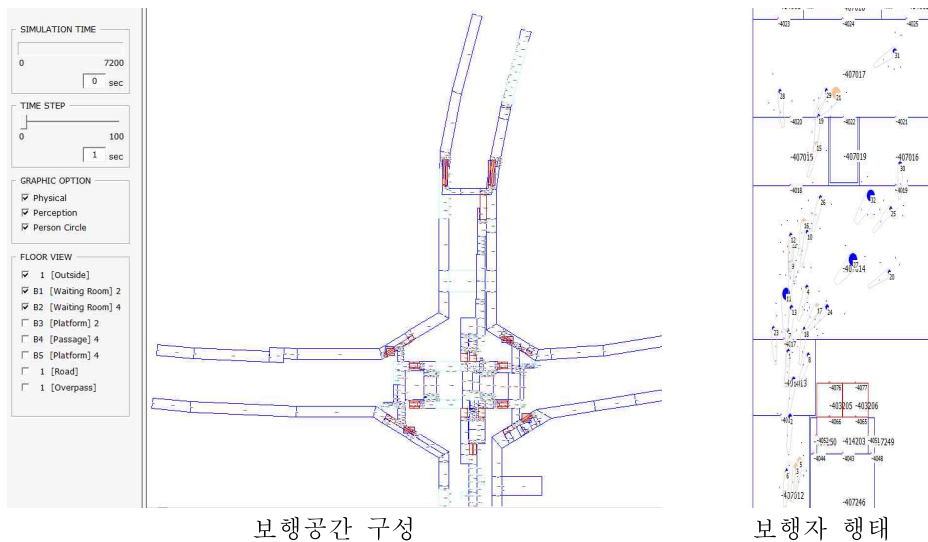
시뮬레이션 수행에 따라서 보행자와 시설물은 다양한 정보를 가지게 되며, 해당 정보를 이용하여 분석 기준에 따라 효과척도를 산출한다. 시뮬레이터 효과척도는 보행자 이동행태, 시설물 이용행태, 시뮬레이션 총 효과척도로 구분되며, 보행공간의 적정성, 대안의 효율성 평가 및 분석이 가능하다. P-Sim의 효과척도는 <표 5-9>와 같다.

---

31) 본 논문의 pp. 23~25 참조. 일반적으로 보행자의 경로선택 행태에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 이동거리이다(Seneviratne and Morrall, 1985; Borgers and Timmermans, 1986; Bovy and Stern, 1990; Verlander and Heydecker, 1997; 안은희 외, 2004; Li and Tsukagichi, 2005; Gim and Ko, 출간예정).

<표 5-9> P-Sim의 효과척도 산출

구분	보행자	시설물	시뮬레이션 전체
효과 척도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 속도(현재속도, 평균속도)</li> <li>• 이동거리, 이동시간</li> <li>• 상충수 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 서비스시간</li> <li>• 대기시간</li> <li>• 이용인원</li> <li>• 대기인원 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총 시뮬레이션 시간</li> <li>• 총 이동거리, 이동시간</li> <li>• 공간의 보행량, 밀도, 평균속도 등</li> </ul>



<그림 5-12> P-Sim의 실행화면

### ⑤ P-Sim 검증

P-Sim의 검증은 verification<sup>32)</sup>에 해당하며, 일반적으로 시뮬레이터의

32) validation은 사용자 입장에서 소프트웨어가 만족스러운지를 평가하는 과정으로 보행자 시뮬레이터의 경우, 시뮬레이션이 실제현상을 정확히 설명하고 있는 정도를 평가하는 것이 포함된다. 반면, verification은 소프트웨어 개발이 요구사항 명세서와 설계 명세서에 따라 정확하게 구현하였는지, 소프트웨어의 버그가 있는지를 확인하는 과정을 의미한다.

요구사항이 적절하게 구현되었는지를 확인하는 과정을 의미한다. 시뮬레이터의 입력자료와 시뮬레이션을 통해 산출되는 값이 기준에 만족하는지를 확인하는 과정이다.

먼저, P-Sim의 입력자료인 보행자 유형별 속도, 시설물 이용시간 등은 현장조사를 통해 산정된다. 예를 들어, 보행자의 속도분포는 정규분포를 따르는 것으로 나타났으며, 일반보행자의 경우, 평균속도는 1.33m/s이고, 표준편차는 0.2m/s이다. 해당 입력자료를 시뮬레이터에 구축하고 난수를 발생시켜, 시뮬레이션을 구현한 후, <표 5-10>과 같이 요구사항에 만족하는지 확인하였다.

**<표 5-10> P-Sim의 입력자료 확인**

구분		현장조사		본 모형		표본 크기
		분포	평균	분포	평균	
시설물 이용시간 (초)	매표소 이용	Erlang 분포	7.4	Erlang 분포	7.3	70
	화장실이용 (남자기준)	Erlang 분포	2.0	Erlang 분포	2.3	30
	편의시설 이용	정규분포	27.0	정규분포	26.6	80
보행속도(m/s)		정규분포	1.33	정규분포	1.36	100

주: 현장조사결과는 국토교통부(2011b)의 자료를 이용하였다.

또한 본 연구에서는 여러 영향요인에 대한 개별보행자 단위의 행태를 퍼지추론을 통해 모형화하였으므로, 비퍼지값이 P-Sim에서 정확하게 산출되는지에 대한 확인이 필요하다. P-Sim에서 보행자의 특성, 보행공간의 속성, 사회적 환경 요인 등에 따라 산출되는 수정가능성 값을 확인한 결과, 비퍼지값은 퍼지연산과 비퍼지화 과정을 통해 도출된 값과 동일한 것으로 나타났다.

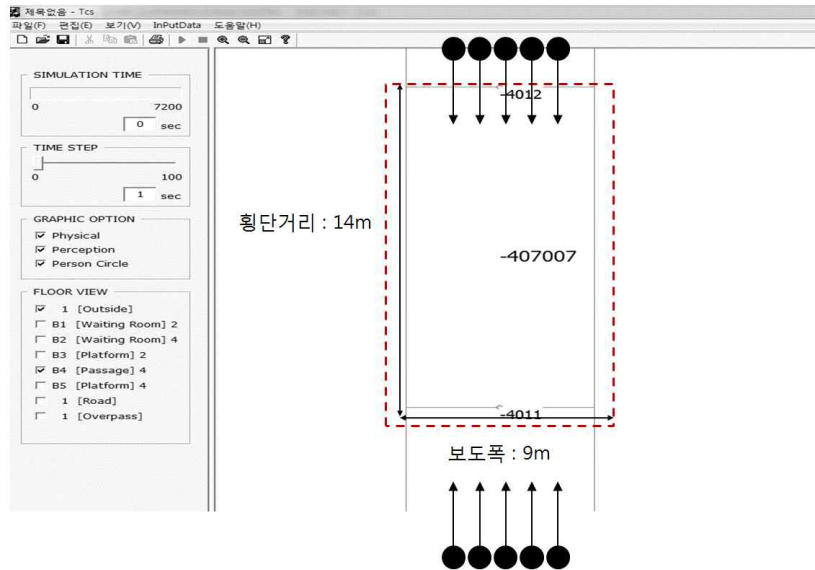


## ⑥ 시뮬레이션 수행

보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 관측자료와의 비교를 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 밀도에 따른 분석시나리오에 따라 관측자료와 동일한 조건의 보행 OD를 <표 5-11>과 같이 구축하고 보행공간은 영상촬영자료와 동일하게 구현하였다(<그림 5-13> 참조). 보행 OD는 관측자료의 보행교통류율을 기준으로 시간당 5천명~11천명까지의 조건을 만들어 사용하였으며, 양방향 동일한 보행량을 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

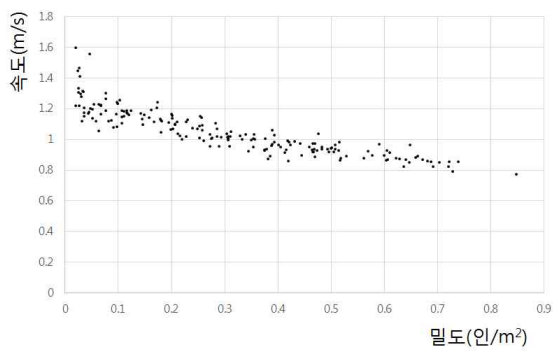
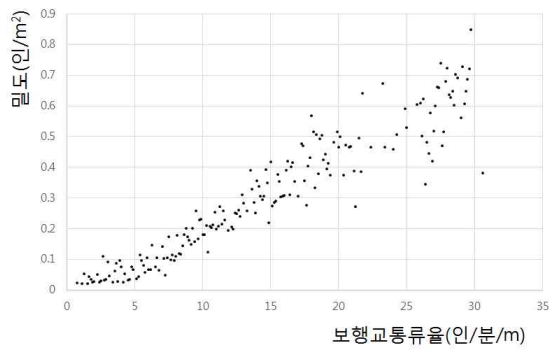
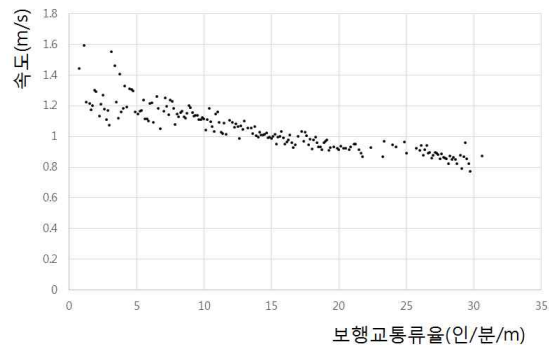
**<표 5-11> 보행 OD 구축**

구분	시간대	전체 보행량(인/시)	방향별 보행량(인/시)
시나리오 1	1	5,000	2,500
	2	7,000	3,500
시나리오 2	3	9,000	4,500
	4	11,000	5,500



<그림 5-13> 시뮬레이션 네트워크 구성

시뮬레이션을 수행하여 보행자의 단위시간별 속도, 위치 등 개별행태 특성과 이를 집계한 거시적 관점의 속도, 밀도 특성을 도출하였다. 초기 보행자가 보행공간에 유입된 후, 보행교통류가 안정화 상태에 도달하면, 시뮬레이션 효과척도를 산출한다. 시뮬레이션을 통해 도출된 개별행태를 기반으로 보행교통류율, 밀도, 속도 간의 거시적 관계를 시각적으로 살펴 보면 <그림 5-14>와 같다.



<그림 5-14> 모형추정자료의 보행교통류율, 속도, 밀도 관계

## 제 3 절 검증 결과

### 1. 거시적 보행교통류 특성

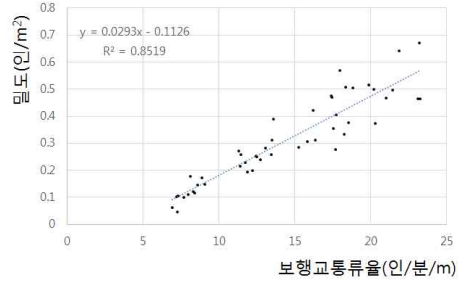
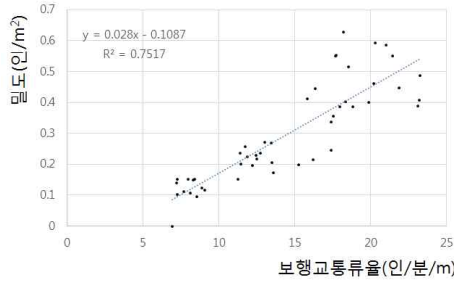
#### 1) 그래프 유사성 비교

거시적 보행교통류 평가지표 비교에 앞서, 관측자료의 속도-밀도-보행교통류를 관계(이하 관측)와 모형을 적용한 시뮬레이터 결과(이하 모형)을 통해 산출된 속도-밀도-보행교통류를 관계는 <그림 5-15>와 같다. 그래프를 이용하여 두 자료의 유사성을 직관적으로 비교하면, 먼저 선형식을 추정한 결과, 대부분 보행특성간의 결정계수( $R^2$ )가 0.6 이상인 것으로 나타나 선형식이 변수간 관계를 어느 정도 설명하고 있다고 판단된다. 관측과 모형 두 그래프가 기존의 거시적 보행교통류 이론과 동일한 패턴을 보이고 있으며, 본 연구에서 개발한 모형의 개별행태가 거시적 보행특성을 적절하게 구현하고 있다고 설명할 수 있다.

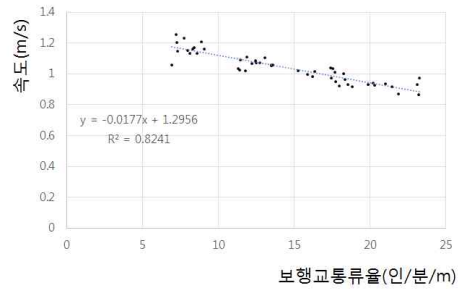
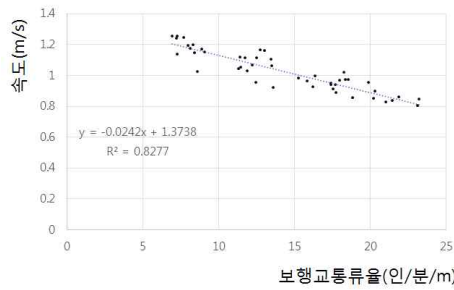
관측

모형

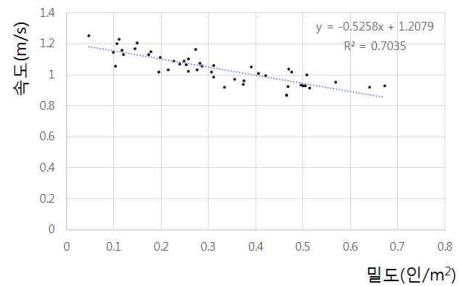
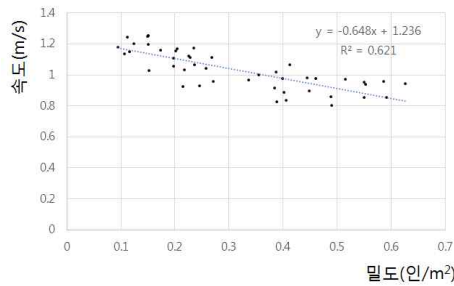
보행교통류율-밀도



보행교통류율-속도



밀도-속도



<그림 5-15> 모형-관측 간 거시적 보행교통류 특성 비교

## 2) 보행교통류율-속도, 보행교통류율-밀도 관계

보행 교통상황을 밀도가 낮은 시나리오 1, 밀도가 높은 시나리오 2로 구분하여 보행교통류율-속도, 보행교통류율-밀도 관계를 P-Sim의 기존 모형과 본 연구의 모형으로 구분하여 검증하였다. 검증결과는 <표 5-12>와 같다.

먼저, 본 모형의 경우, 전체 표본 48개를 대상으로 오차를 살펴본 결과, MAE의 경우 보행교통류율-밀도는 0.069, 보행교통류율-속도는 0.059로 나타났고, RMSE는 각각 0.100, 0.077로 분석되었다. Theil의 부등계수의 경우 밀도 0.269, 속도 0.136로 0에 가까워 관측치와 모형결과가 유사하다고 판단할 수 있다.

서비스수준에 따른 관측과 모형간 오차를 보다 상세하게 검토하기 위하여 시나리오별 평가지표를 살펴보면, 밀도의 경우 시나리오 2에 비해 시나리오 1의 오차가 작아서 모형이 관측값을 더 잘 설명하고 있는 것으로 나타났고, 속도는 시나리오 2의 오차율이 시나리오 1보다 낮아서 관측값에 더 가까운 것으로 분석되었다. 이는 관측자료 속도의 표준편차가 밀도가 높아질수록 줄어들기 때문으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 P-Sim의 기존 모형과 본 모형의 결과를 비교하였다. P-Sim의 보행이동행태는 보행자 시야각( $180^\circ$ )를 기준으로  $30^\circ$ 도 단위의 6개의 지점을 구분하고, 보행자 속도, 성향, 보행밀도에 따라 회피 여부를 결정하는 알고리즘으로 구성되어 있으며, 보행자의 주관성, 불확실성 등에 대한 퍼지개념이 포함되어 있지 않다. 비교결과, 본 모형의 관측과 시뮬레이터 결과간 오차가 P-Sim에 비해 다소 적은 것으로 나타났다. 특히 밀도가 높은 보행교통상황의 시나리오 2는 본 모형이 관측과의 오차가 적어 모형의 설명력이 더 높다고 할 수 있다.

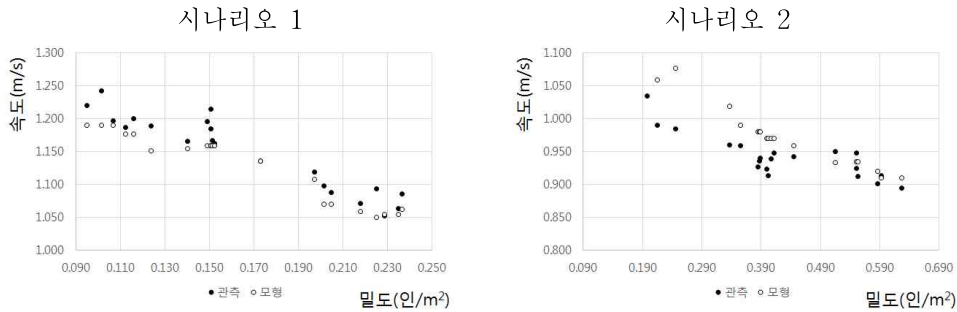
<표 5-12> 모형의 검증결과

구분		밀도			속도		
		본 모형 A	P-Sim B	차이 (A-B)/B×100	본 모형 A	P-Sim B	차이 (A-B)/B×100
전체	MAE	0.069	0.091	-24.2%	0.059	0.121	-51.2%
	RMSE	0.100	0.124	-19.4%	0.077	0.145	-46.9%
	U	0.269	0.314	-14.3%	0.136	0.182	-25.3%
시나리오 1	MAE	0.032	0.044	-27.3%	0.065	0.069	-5.8%
	RMSE	0.047	0.056	-16.1%	0.089	0.095	-6.3%
	U	0.247	0.285	-13.3%	0.140	0.143	-2.1%
시나리오 2	MAE	0.107	0.137	-21.9%	0.054	0.173	-68.8%
	RMSE	0.134	0.166	-19.3%	0.063	0.182	-65.4%
	U	0.272	0.318	-14.5%	0.129	0.212	-39.2%

주: 본 모형은 의사결정과정의 주관성, 불확실성을 고려하기 위한 퍼지추론이 포함된 모형을 의미하며, P-Sim은 퍼지개념이 포함되지 않은 모형이다.

### 3) 속도-밀도 관계

본 연구에서는 동일한 보행교통류율에서 속도, 밀도의 모형과 관측의 오차를 검증과 함께, 거시적 교통류 특성을 잘 설명하는 속도-밀도 관계식을 토대로 관측과 모형 간의 오차를 살펴보았다. 관측과 모형의 속도-밀도 관계는 서로 동일한 기준으로 분류되어 있지 않으므로, KNN(k-nearest neighbor, 최근린 이웃)기법을 활용하여 비슷한 속성을 갖는 군집을 형성하였다. KNN 군집을 통해 시뮬레이터 결과의 속도-밀도 관계를 추정한 후, 관측과 비교하였다. 분석시나리오별 관측자료와 모형결과의 속도-밀도 관계식은 <그림 5-16>이다.



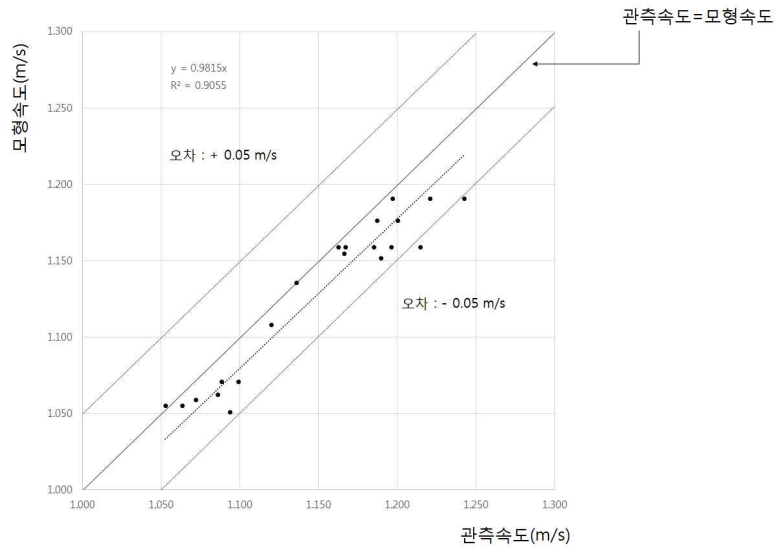
<그림 5-16> 모형과 관측의 속도-밀도 관계

먼저 밀도가 0.3인/m<sup>2</sup> 이하인 시나리오 1에서 보행속도의 관측-모형간 오차는 <그림 5-17>과 같다. 산포도의 추세선 기울기는 0.98이며,  $R^2$ 은 0.91로 기울기가 1(관측속도=모형속도)에 가까운 것으로 나타났으며, 모형의 결과가 관측값을 잘 설명하는 것으로 해석된다. 관측값에 비하여 동일밀도에서 모형의 보행속도는 다소 과소추정되고 있으나,  $\pm 0.05\text{m/s}$  오차범위내에 대부분 포함하는 것으로 보인다.

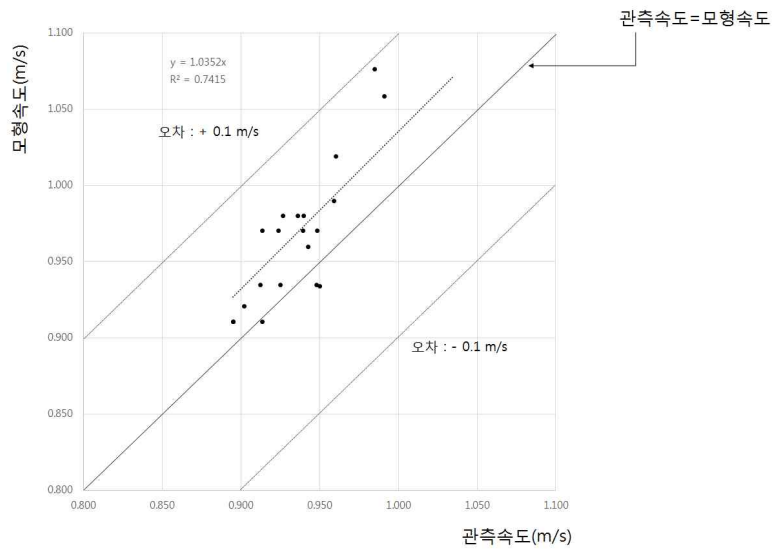
밀도가 다소 높은 보행소통상황의 시나리오 2 역시 관측자료와 모형자료의 속도는 추세선 기울기가 1.04이고,  $R^2$ 는 0.74로 추정되었다(<그림 5-18> 참조). 시나리오 2는 시나리오 1에 비하여 보행량이 많고 밀도가 높기 때문에 관측-모형간 오차는 시나리오 1에 비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나 오차범위  $\pm 0.1\text{m/s}$ 이내에 포함되어 본 연구의 모형의 추정값이 안정적으로 유지되고 있음을 보여준다.

즉, 속도-밀도 관계식을 토대로 관측자료와 모형결과의 오차를 비교한 결과, 관측자료와 모형결과 간 추세선 기울기는 0.95~1.05사이로 나타났다. 기울기가 1인 경우는 모형과 관측값이 동일한 것을 의미하므로, 본 연구의 모형추정값이 관측값을 적절하게 설명하고 있다고 판단된다.





<그림 5-17> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 1)



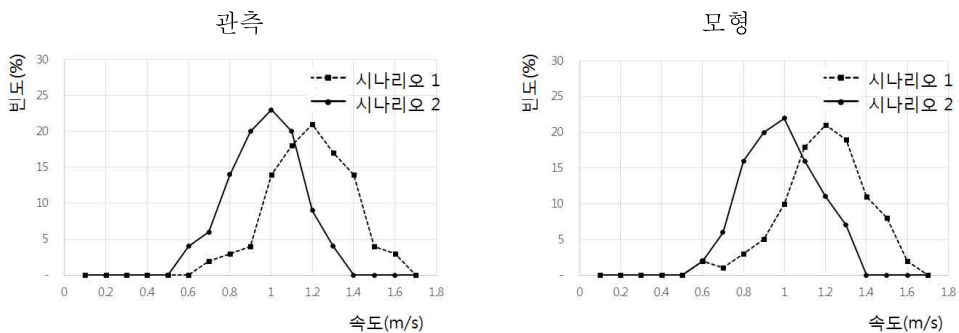
<그림 5-18> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 2)

## 2. 미시적 개별행태

거시적 보행교통류 특성에 대한 검증과 함께 개별보행자 단위 미시적 행태에 대해 관측자료와 모형간 비교를 수행하였다. 개별행태 검증은 퍼지개념이 포함된 본 연구의 모형을 대상으로 한다.

### 1) 속도 분포

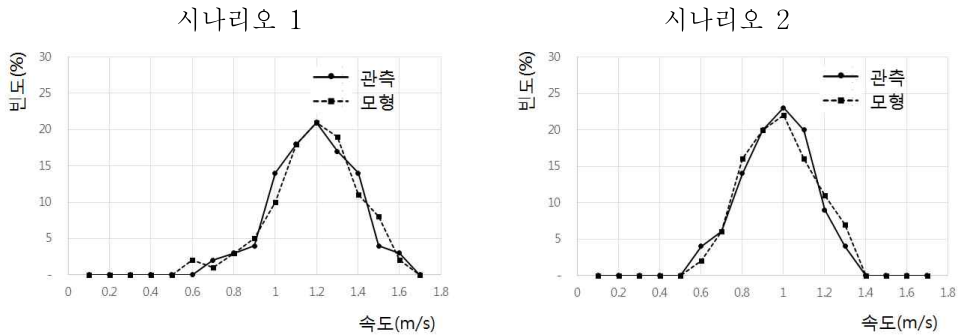
관측자료와 모형추정결과의 속도 분포 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 비교하였다. 여기서 귀무가설은 두 집단간 속도 분포는 차이가 없다는 것이다. 먼저 관측자료와 모형결과의 시나리오별 속도분포는 <그림 5-19>와 같다. 모형추정결과와 관측자료 모두 밀도가 다소 높은 시나리오 2의 속도가 시나리오 1에 비해 낮은 것으로 나타났다.



<그림 5-19> 시나리오별 속도 분포 차이

속도 분포의 동일성 검정 결과는 <표 5-13>과 같다. 먼저 밀도가 낮은 시나리오 1을 대상으로 관측과 모형간 속도 분포의 동일성 검정을 수행하면  $\chi_0^2$  값이 7.10로 나타나, 이는 유의수준 0.05 일 때 임계값 16.92 보다 작은 것으로 나타났다. 즉, 귀무가설을 기각할 수 없고, 모형을 통

해 산출된 속도 분포와 현장조사 개별계적자료의 속도 분포는 동일하다고 할 수 있다. 밀도가 다소 높은 시나리오 2 역시  $\chi_0^2$ 이 4.82로, 임계값 14.07보다 작아서 관측과 모형간 속도 분포는 동일하다.



<그림 5-20> 모형과 관측 간 속도 분포 비교

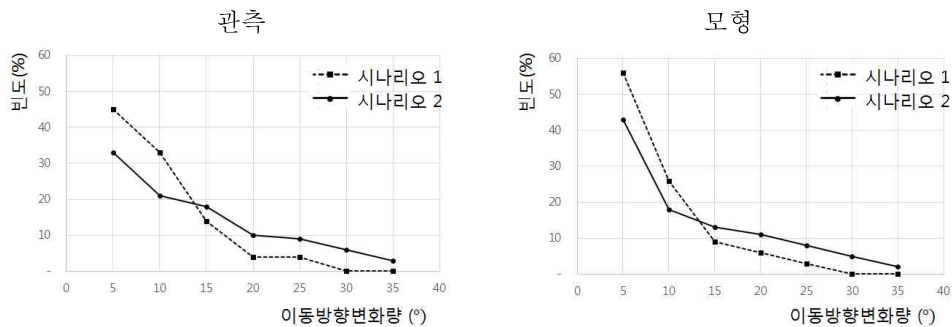
<표 5-13> 모형과 관측 간 속도 분포 동일성 검정

구분	$df$	$\chi_0^2$	$\chi^2(df, 0.05)$	유의확률
시나리오 1 밀도가 낮은 보행상황	9	7.10	16.92	0.63
시나리오 2 밀도가 다소 높은 보행상황	7	4.82	14.07	0.68

## 2) 이동방향 변화량 분포

속도 분포와 동일하게 개별계적정보를 통해 모형과 관측의 이동방향 변화량 분포를 비교하였다. 이동방향 변화량은 1초 단위의 개별보행자 진행방향 차이를 의미하며 변화량 계급은 5°단위로 구분하였다. 관측자료와 모형추정결과의 시나리오별 이동방향 변화량 분포는 <그림 5-21>과 같다. 밀도가 다소 높은 시나리오 2의 이동방향 변화량이 시나리오 1

에 비해 관측자료와 모형결과 모두 큰 것으로 나타났다. 이는 보행공간 내의 보행자가 많아질수록 주변 보행자와의 상호작용이 증가하여 보행자는 이동방향을 변경하고자 하는 가능성이 높아지기 때문으로 판단된다. 반면, 용량에 도달하거나 초과할 정도의 보행량은 개인의 이동방향 변경에 제한을 주기도 한다.

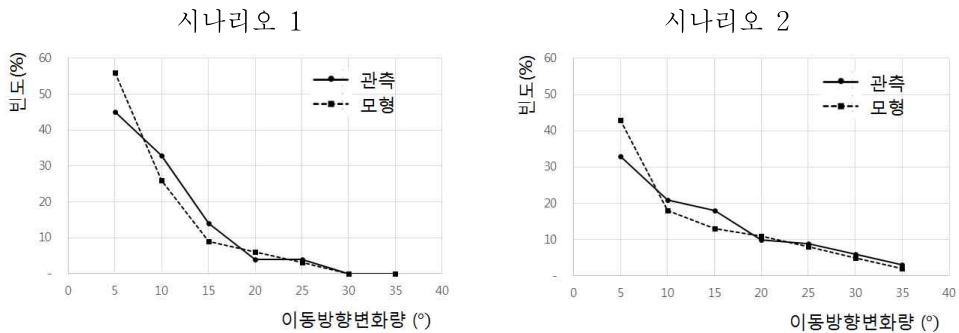


<그림 5-21> 시나리오별 이동방향 변화량 분포 차이

이동방향 변화량 분포의 적합성 여부를  $\chi^2$  검정을 통해 살펴본 결과는 <표 5-14>와 같다. 시나리오 1의  $\chi_0^2$ 이 7.21로, 임계값 9.49보다 작아서 모형과 관측의 이동방향 변화량 분포는 같다고 할 수 있다. 밀도가 높은 시나리오 2의  $\chi_0^2$ 이 5.56이며, P값이 0.47로 귀무가설을 기각하지 못한다. 즉, 관측자료와 모형결과 간 이동방향 변화량 분포는 동일한 것으로 분석되었다.

<표 5-14> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 검정

구분	$df$	$\chi_0^2$	$\chi^2(df, 0.05)$	유의확률
시나리오 1 밀도가 낮은 보행상황	4	7.21	9.49	0.13
시나리오 2 밀도가 다소 높은 보행상황	6	5.56	12.59	0.47



<그림 5-22> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 비교

본 연구에서는 제한적이거나 개별행태 자료를 추출하여 모형의 검증을 수행하였다. 일반적으로 개별행태에 영향을 미치는 요인은 다양하며, 자료 수집의 한계로 모든 개별행태를 검증하는 것은 어렵다. 개별체적을 통해 추출한 개별보행자의 속도 분포와 이동방향 변화량 분포를 대상으로 관측자료와 모형결과 간 동일성 검정을 실시한 결과, 속도 분포, 이동방향 변화량 분포는 두 집단간 차이가 없는 것으로 나타났다.

## 제 6 장 결론

### 제 1 절 연구결과의 요약 및 시사점

보행이 활성화되고 보행공간에 대한 계획 및 운영이 중요하게 인식됨에 따라, 보행행태를 반영한 보행공간 평가 틀에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정이 반영된 보행이동행태모형을 개발하였다. 이를 보행자 시뮬레이터(P-Sim)에 구현하고 현장조사자료와 비교, 분석을 통해 모형의 신뢰성을 검증하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하여, 보행공간의 분석에 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당하고, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 다루고 있다. 실행단계는 계층적 의사결정구조 중 하위단계로 보행행태모형의 기초가 된다.

본 연구의 보행이동행태모형은 크게 5가지 특성을 가지고 있다. 첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현하며, 둘째, 본 모형의 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 셋째, 보행이동행태는 의사결정과정이며, 개인의 주관성, 불확실성, 애매함 등 특성을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 퍼지추론 접근방식을 활용하였다. 넷째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 마지막 특성으로 보행이동행태는 의사결정단계와 실제행동단계 2가지로 구분된다. 의사결정단계는 환경적 요인, 개별특성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는 과정이며, 이때 수정가능성은 IF-THEN 규칙, 소속도 함수, 퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 산정된다. 실제행동단계는 의사결정단계의 수정가능성을 고려하여 실제 이동을 구현하는 과정으로, 본 연구에서는 널리 활용되고 있는 Social Force Model를 이용하였다.

보다 정교하고 객관적인 보행이동행태모형을 위해, 본 연구에서는 설

문조사에 근거하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 이항로짓 모형을 이용하였으며, 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 성별, 연령, 통행목적 등 개별특성과 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도 등 사회적 환경 요인, 보행공간의 폭 등 물리적 환경 요인이 선정되었다. 또한 남성이 여성보다, 연령이 적을수록, 업무통행일수록 또한 장애물과의 거리가 가까울수록, 장애물이 의사결정주체의 정면에 위치할수록, 다가오는 사람일수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높아지는 것으로 분석되었다. 통계적으로 유의미한 변수를 퍼지추론의 영향요인을 선정하고, 설명변수와 종속변수간 관계를 통해 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 또한 실제 보행행태조사를 통해 장애물을 회피하는 행태를 분석하고 퍼지추론의 소속도 함수를 생성하여, 보다 현실적인 모형을 구축하고자 하였다.

마지막으로, 개발된 모형을 P-Sim에 구현하고 현장조사자료와의 비교를 통해 검증 및 평가를 수행하였다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 대상지역은 명동 상업지역으로 보행량이 많고 차량통행이 제한되어 있어서 보행행태를 수집하기 용이하다. 모형의 검증은 크게 개별자료가 집계된 거시적 보행교통류 특성비교와 개별보행자 단위의 행태비교로 구성된다. 거시적 보행교통류 특성인 속도, 밀도, 보행교통량을 대상으로 모형과 관측자료를 비교하고, 이때 평가지표는 RMSE, MAE, Theil의 부등계수를 사용하였다. 개별행태 검증은 보행자 궤적을 토대로 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 산정하고, 모형과 관측 분포의 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 살펴보았다. 분석결과, 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 본 모형이 거시적 보행교통류 특성을 설명하는 것으로 판명되었고, 개별행태 역시 관측과 동일한 분포를 보이는 것으로 조사되었다.

교통분야에서 차량교통에 비해 보행교통과 관련된 연구는 상대적으로 소외되어 온 것이 사실이다. 보행은 인간이 선택할 수 있는 가장 기본적인 교통수단으로써 모든 통행의 시작과 끝을 담당하는 중요한 수단이다. 또한 보행은 교통수단뿐 아니라, 개인, 지역, 국가 차원 등 다양한 측면

에서 편익을 창출하는 기능을 수행한다. 먼저 개인적 측면에서 보행은 인간의 건강을 증진시키는 역할을 한다. 지역적 차원에서는 지역주민과의 교류를 활발하게 하며, 지역내 보행활성화를 통해 경제적 편익이 발생하기도 한다. 또한 보행은 지속가능한 비동력 교통수단으로써 국가적 차원에서 사회적 비용을 감소시킨다.

최근 보행의 중요성에 많은 사람들이 공감하고 있고, 이러한 변화와 함께 본 연구에서는 보행행태와 보행공간 분석에 대한 연구를 분류하고 선행연구를 검토하였다. 보행행태를 반영한 보행공간 평가 틀에 대한 요구가 증가하고 있으며, 기존 거시적 모형으로는 세밀한 운영방안, 시설설치에 대한 분석이 어려운 한계가 있다. 본 모형은 개별보행자 단위의 행태를 반영하고 인간의 사고에 기반을 둬으로써 기존 모형의 한계를 극복한 점에 있어서 의미가 있다. 이를 기반으로 보행공간의 계획 및 운영단계에서 다양하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 단순히 보행공간의 용량분석에 제한되지 않고, 새로운 보행시설 또는 보행정책의 도입 시 다양하고 미세한 보행공간 변화를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 2 절 한계 및 향후 연구 과제

본 연구의 한계점과 향후 연구는 크게 4가지로 제시하였다.

첫째, 개별보행자 단위의 미시적 보행행태는 보행자의 특성, 주변 상황 등 다양한 요인이 복합적으로 영향을 미치고 잠재요인이 상당수 포함되어 있기 때문에 이를 모형에 반영하는데 제한이 있다. 본 연구에서는 보행자의 이동행태에 영향을 미치는 일부 요인을 대상으로 모형을 개발하였다. 분석결과, 통행빈도, 보행공간의 밀도, 경사유무 등의 요인이 통계적 유의성을 갖지 못하는 것으로 나타나서 본 모형에서는 제외되었다. 향후 다양한 요인이 추가로 고려된다면 보행이동행태모형의 신뢰성은 높



아질 것으로 판단된다.

둘째, 본 연구의 보행행태는 실행단계의 보행이동행태를 대상으로 한다. 전략, 전술단계에 해당하는 보행자의 목적지, 보행공간내의 활동, 경로는 미리 정해진 것으로 간주하고 미시적 상호작용을 고려한 이동행태에 집중하여 모형을 개발하였다. 실제 보행공간에서 보행행태는 전략, 전술, 실행단계의 계층적 의사결정구조로, 각 단계는 상호연관성을 가지고 있다. 따라서 보행자의 목적지 및 활동선택, 경로선택행태와 미시적 보행이동행태가 상호연관성을 갖는 모형개발이 필요하다. 즉, 전략, 전술, 실행단계가 통합된 보행행태모형이 구현되어야 할 것이다.

셋째, 개별보행자 단위의 미시적 보행행태는 다양한 상황에 대한 자료수집의 한계로 검증이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이에 일반적으로 개별행태가 집계되어 형성되는 거시적 특성이 검증에 주로 활용된다. 본 연구에서 개별보행자 궤적 정보를 이용하여 속도, 이동방향 특성에 대한 개별행태 검증을 수행하였으나, 전체 보행자가 아닌 일부를 대상으로 하였다는 한계를 가지고 있다.

넷째, 본 연구는 유동인구 영상촬영자료와 모형 간 비교를 통해 검증을 수행하였다. 영상촬영자료는 명동 상업지역의 보행전용도로를 대상으로 하며, 보행행태를 수집하고 분석하기에 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 분석대상지역의 평균 보행속도는 기존 연구에 비해 다소 낮고 밀도를 효과적으로 설정할 경우 서비스수준이 C이상으로 비교적 혼잡하지 않은 보행상황을 보이고 있다. 본 연구는 밀도가 낮은 상황을 대상으로 검증을 수행하였다는 한계를 가지고 있으며, 환승센터, 복합상업시설 등 여러 보행공간 계획 및 운영에 본 모형을 활용하기 위해서는 혼잡 등 다양한 보행상황에 대한 검증이 추가로 요구된다. 또한 화재, 재난 등 긴급상황 시 보행행태는 일반보행행태와 차이가 나므로 향후 이에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 곽수영·남현우·전철민, 2012. 건물내 전체 인원분포를 고려한 실내 보행자 최적 대피모형. 한국지형공간정보학회지, 20(2): 23~29.
- 국가기술표준원, 2004. 제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서.
- 국토교통부, 2011a. 제1차 비동력·무탄소 교통수단 활성화 종합계획(2012~2016).
- 국토교통부, 2011b. 교통연계 및 환승시스템 기술개발 최종보고서.
- 국토교통부, 2013. 도로용량편람.
- 김강수·조혜진, 2006. SP 조사설계 및 분석방법론. 보성각.
- 김건영·김형철·오승훈, 2002. 주거지역 이면도로의 보행행태특성 분석. 대한토목학회지, 22(2-D): 197~205.
- 김기현·손동욱·이동훈, 2014. 상업가로의 물리적 특성과 보행밀도와의 연관성 분석. 한국도시설계학회지, 15(5): 161~171.
- 김영옥, 2003. Space Syntax를 활용한 공간구조속성과 공간사용패턴의 상호관련성 연구. 국토계획, 38(4): 7~17.
- 김영옥·신행우, 2004. 서울 북촌의 공간구조 분석을 위한 방법론 연구. 대한건축학회논문집, 20(9): 201~209.
- 김영옥·신행우, 2007. 토지이용에 따른 보행특성에 관한 연구: Space Syntax를 활용한 보행네트워크 분석과 보행량의 상호관련성을 중심으로. 한국도시설계학회지, 8(3): 83~94.
- 김장욱·남궁문·김정현·이수범, 2006. 퍼지 및 신경망 이론을 이용한 교통사고예측모형 개발에 관한 연구. 대한교통학회지, 24(7): 81~90.
- 김정현·오영태·손영태·박우신, 2002. 보행자 시설 서비스수준 산정에 관한 연구. 대한교통학회지, 20(1): 149~156.
- 김찬주·김영옥, 2007. 지하철 역사공간에서 승객의 유동 패턴에 관한 연구. 대한건축학회논문집, 23(11): 71~78.

- 김태호·이기영·박제진, 2009. 보행자의 인식서비스수준에 대한 요인분석. 서울도시연구, 10(2): 161~173.
- 남궁문·성수련·김경태·서승환, 1995. 퍼지추론을 이용한 도로경로선택 모델화 수법. 한국 퍼지 및 지능시스템학회지, 5(3): 92~100.
- 도로교통안전협회, 1982. 보행속도 조사연구보고서.
- 문태헌·성한욱, 2006. 보행환경 개선을 위한 보행자 에이전트(Agent) 모형의 개발과 시뮬레이션. 국토계획, 41(6): 79~92.
- 박희제·배상훈·정희진, 2008. 인간공학적 요소를 반영한 첨단차량 추종모형. 대한교통학회지, 26(2): 121~133.
- 서울특별시, 2013. 서울 유동인구조사보고서.
- 서울특별시, 2014a. 서울특별시 도시교통정비 기본계획.
- 서울특별시, 2014b. 서울 유동인구조사보고서.
- 성기범·한명주·이영인·노문섭, 2011. 실험조사를 통한 보행자의 장애물 회피행태 분석. 교통연구, 18(2): 61~75.
- 손영태·박우신·김상구·김태완·김영호, 2004. CA기반 보행교통류 Simulation 모형 개발. 대한토목학회지, 24(4-D): 563~568.
- 안은희·강석진·이경훈, 2004. 대규모 지하 상업공간에서의 보행자의 움직임과 경로선택 특성에 관한 연구. 대한건축학회논문집, 20(9): 21~28.
- 오성훈·남궁지희, 2011. 보행도시: 좋은 보행환경의 12가지 조건. 건축도시공간연구소.
- 오성훈·이소민, 2013. 보행환경과 행태: 조사분석 보고서(1). 건축도시공간연구소.
- 윤상원·배상훈, 2007. 대중교통 수단선택과 연계한 복합환승센터 내 보행자 최적경로 산정. 한국ITS학회논문지, 6(2): 56~56.
- 윤성환·이정재·이민정, 2009. buildingEXODUS를 활용한 행위기반 피난시뮬레이터의 신체 및 심리적 변수에 대한 민감도 분석. 대한건축학회논문집, 25(9): 347~355.
- 이상훈·김성환, 2003. 퍼지 비가법 제어를 이용한 도시 교통망의 경로 탐

- 색. 대한교통학회지, 21(1): 103~113.
- 이상훈·김덕영·김성환, 2002. 퍼지평가방법을 이용한 교통노선 결정. 대한교통학회지, 20(1): 65~76.
- 이승재, 2013. 행위자 기반 시뮬레이션 모형을 이용한 시각-보행 통합 분석. 고려대학교 박사학위 논문.
- 이신해, 2012. 서울시 보도의 보행 LOS 진단 및 분석방법 개선에 관한 연구. 대한교통학회지, 30(3): 7~15.
- 이신해·이승재, 2009. 행위자 기반(agent-based) 보행 시뮬레이션 모델을 이용한 보행시설 설치 실험에 관한 연구. 한국ITS학회논문지, 8(3): 131~138.
- 이용미, 2009. 보행자 행태분석 알고리즘을 적용한 환승센터 시뮬레이터 프로토타입 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
- 이인성·김현옥, 1998. 도시주거지 보행경로 선택행태에 관한 연구: GIS를 이용한 보행환경 만족도의 분석. 국토계획, 33(5): 117~129.
- 이종호, 2003. 교통시스템분석시 에이전트기반모형기법의 적용. 대한교통학회지, 21(1): 147~156.
- 이종호, 2008. 미시적 보행시뮬레이션모형의 연구동향. 교통기술과정책, 5(4): 23~33.
- 이준, 2012. 보행교통류에서의 PSO를 고려한 회전육각격자모형 개발. 교통연구, 19(3): 35~45.
- 이준, 2013. 일반 보행자와 피난자의 보행행태 특성에 관한 기초연구. 교통연구, 20(1): 43~54.
- 이준·허민국·정진혁, 2009. 보행교통류를 위한 회전육각격자모형 개발. 대한교통학회지, 27(1): 169~177.
- 이희연·노승철, 2012. 고급통계분석론: 이론과 실습. 문우사.
- 임은선, 2008. 알기 쉬운 연구방법론: 퍼지이론. 국토, 322: 110~119.
- 임진경·신혜숙·김형철, 2004. 유형별 보행자도로의 서비스수준 평가기준 설정. 대한토목학회지, 24(5-D): 723~728.
- 정영근·박창호, 2005. 퍼지 추론을 이용한 최단 경로 탐색 알고리즘의 개

- 발. 대한교통학회지, 23(8): 171~179.
- 정혜선·김영옥, 2012. 지상·지하공간의 수직연계유형 설정 및 보행네트워크 분석. 대한건축학회논문집, 28(9): 3~11.
- 채석·오영석, 1995. 퍼지이론과 제어. 청문각.
- 채승병·조항현·문희태, 2007. 행위자 기반 모형과 그 응용. 물리학과 첨단기술, 16(10): 10~14.
- 최성택·이향숙·추상호·김수재, 2015. Social path를 반영한 보행 접근성 평가에 관한 연구. 대한교통학회지, 33(1): 50~60.
- 하슬·조윤옥·구남국·박광필·이규열·노명일, 2013. 보행 방향 포텐셜 함수 기반의 탈출 경로 결정 알고리즘을 이용한 여객선 승객 탈출 시뮬레이션. 대한조선학회논문집, 50(5): 307~313.
- 한명주·최동훈·정기찬·이영인, 2010. 미시적 보행자 시뮬레이터(P-Sim: Pedestrian-Simulator)의 기본구조 및 개발개요. 교통기술과정책, 7(2): 15~29.
- 한명주, 2015. 보행자 행태를 반영한 보행공간 분석 프로그램. 철도저널, 18(3): 103~108.
- 한상진·김영옥·오순미, 2008. 연결도를 이용한 보행네트워크와 보행통행량의 상호관련성 연구. 대한교통학회지, 26(1): 137~144.
- Antonini, G., M. Bierlaire and M. Weber, 2006. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. Transportation Research Part B, 40(8): 667~687.
- Armstrong, R. L., 1987. The midpoint on a five-point Likert-type Scale. Perceptual and Motor Skills, 64(2): 359~362.
- Asano, M., T. Iryo and M. Kuwahara, 2009. A pedestrian model considering anticipatory behaviour for capacity evaluation. Transportation and Traffic Theory, 2009: 559~581.
- Asano, M., T. Iryo and M. Kuwahara, 2010. Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour. Transportation Research Part C, 18(6): 842~

855.

- Batty, M. and B. Jiang, 1999. Multi-agent simulation: New approaches to exploring space-time dynamics with in GIS. Centre for Advanced Spatial Analysis, Working Paper Series, Paper 10, University College London.
- Blue, V. J. and J. L. Adler, 1998. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro simulation. *Transportation Research Record*, 1644: 29~36.
- Blue, V. J. and J. L. Adler, 2001. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B*, 35(3): 293~312.
- Boarnet, M. and R. Crane, 2001. *Travel by design: the influence of urban form on travel*. Oxford University Press.
- Borgers, A. and H. Timmermans, 1986. A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. *Geographical Analysis*, 18(2): 115~128.
- Bovy, P. H. L. and E. Stern, 1990. Route choice: Wayfinding in transport networks. *Studies in Operational Regional Science*, 9: 1~14.
- Bowman, B. L. and R. L. Vecellio, 1994. Pedestrian walking speeds and conflicts at urban median locations. *Transportation Research Record*, 1438: 67~73.
- Burstedde, C., K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz, 2001. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295(3~4): 507~525.
- Cheung, C. Y. and W. H. K. Lam, 1998. Pedestrian route choices between escalators and stairways in metro stations. *Journal of Transportation Engineering*, 124(3): 277~285.
- Daamen, W., 2004. *Modelling passenger flows in public transport*

- facilities. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Daamen, W. and S. P. Hoogendoorn, 2003. Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Record*, 1828: 20~30.
- Daamen, W., S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy, 2005. First-order pedestrian traffic flow theory. *Transportation Research Record*, 1934: 43~52.
- Finnis, K. K. and D. Walton, 2008. Field observations to determine the influence of population size, location and individual factors on pedestrian walking speeds. *Ergonomics*, 51(6): 827~842.
- Fruin, J. J., 1971. *Pedestrian planning and design*.
- Galea, E. R. and J. M. P. Galparsoro, 1994. A computer-based simulation model for the prediction of evacuation from mass-transport vehicles. *Fire Safety Journal*, 22(4): 341~366.
- Garling, T. and G. W. Evans, 1991. *Environment, cognition, and action: An integrated approach*. Oxford University Press.
- Gerdelan, A. and C. O'Sullivan, 2010. A genetic-fuzzy system for optimising agent steering. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 21(3~4): 453~461.
- Gim, T.-H. T. and J. Ko, forthcoming. Maximum likelihood and Firth logistic regression of the pedestrian route choice: a case of Seoul, South Korea. *International Regional Science Review*.
- Gipps, P. G. and B. Marksjo, 1985. A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27(2~3): 95~105.
- Golledge, R. G., A. J. Ruggles, J. W. Pellegrino and N. D. Gale, 1993. Integrating route knowledge in an unfamiliar neighborhood: Along and across route experiments. *Journal of Environmental Psychology*, 13(4): 293~307.

- Guo, Z., 2009. Does the pedestrian environment affect the utility of walking? A case of path choice in downtown Boston. *Transportation Research Part D*, 14(5): 343~352.
- Guo, Z. and B. P. Y. Loo, 2013. Pedestrian environment and route choice: evidence from New York City and Hong Kong. *Journal of Transport Geography*, 28: 124~136.
- Hall, E. T., 1966. *The hidden Dimension*. Garden City.
- Harris, C. and N. Dines, 1988. *Time-saver standards for landscape architecture*. McGraw-Hill.
- Helbing, D., 1992. A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6: 391~415.
- Helbing, D. and P. Molnar, 1995. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5): 4282~4286.
- Helbing, D. and P. Molnar, 1998. Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *Self-organization of complex structures: from individual to collective dynamics*, Gordon and Breach.
- Henderson, L. F., 1974. On the fluid mechanic of human crowd motions. *Transportation Research*, 8: 509~515.
- Hill, M. R., 1982. Spatial structure and decision-making of pedestrian route selection through an urban environment. Ph.D. thesis, University of Nebraska-Lincoln.
- Hoogendoorn, S. P., 2001. *Normative pedestrian flow behavior: Theory and Applications*, Delft University of Technology.
- Hoogendoorn, S. P. and P. H. L. Bovy, 2004. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, 38(2): 169~190.
- Hoogendoorn, S. P., P. H. L. Bovy and W. Daamen, 2002. Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*: 123~154.



- Huang, L., S. C. Wong, M. Zhang, C.-W. Shu and W. H. K. Lam, 2009. Revisiting Hughes' dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm. *Transportation Research Part B*, 43(1): 127~141.
- Hughes, R. L., 2002. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B*, 36(6): 507~535.
- Ishaque, M. M. and R. B. Noland, 2008. Behavioural issues in pedestrian speed choice and street crossing behaviour: A Review. *Transport Reviews*, 28(1): 61~85.
- Kirchner, A., H. Klupfe, K. Nishinari, A. Schadschneider and M. Schreckenberg, 2004. Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics. *Journal of Statistical Mechanics*, 2004: 10011.
- Kitazawa, K. and M. Batty, 2004. Pedestrian behaviour modelling: An application to retail movements using a genetic algorithm. In seventh international conference on design and decision support systems in architecture and urban planning.
- Kitazawa, K. and T. Fujiyama, 2009. Pedestrian vision and collision avoidance behavior: investigation of the information process space of pedestrians using an eye tracker. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*: 95~108.
- Knoblauch, R., M. Pietrucha and M. Nitzburg, 1996. Field studies of pedestrian walking speed and start-up time. *Transportation Research Record*, 1538: 27~38.
- Lam, W. H. K., J. F. Morrall and H. Ho, 1995. Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. *Transportation Research Record*, 1487: 56~62.
- Li, Y. and H. Tsukaguchi, 2005. Relationships between network topology and pedestrian route choice behavior. *Journal of the*

- Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6: 241~248.
- Lotan, T. and H. Koutsopoulos, 1993. Models for route choice behaviour in the presence of information using concepts from fuzzy set theory and approximate reasoning. *Transportation*, 20(2): 129~155.
- Lovas, G. G., 1994. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B*, 28(6): 429~443.
- Maniccam, S., 2002. Traffic jamming on hexagonal lattice. *Physica A*, 321(3~4): 653~664.
- Marchand, B., 1974. Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment: A French example. *Environment and Planning*, 6(5): 491~507.
- MathWorks, 2014. MATLAB fuzzy logic toolbox: User's guide.
- Matsushita, S. and S. Okazaki, 1991. A study of simulation model for way finding behavior by experiments in Mazes. *Journal of Architecture and Planning*, 429: 51~59.
- Muramatsu, M., T. Irie and T. Nagatani, 1999. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A*, 267(3~4): 487~498.
- Nasir, M., C. P. Lim, S. Nahavandi and D. Creighton, 2014. A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 45: 18~34.
- Okazaki, S., 1979. A study of pedestrian movement in architectural space, Part 1: Pedestrian movement by the application on of magnetic models. *Transactions of Architectural Institute of Japan*, 283: 111~119.
- Okazaki, S. and S. Matsushita, 1981. A study of pedestrian movement in architectural space, Part 5: A proubing walk and a guide walk by a guideboard. *Journal of Architecture and Planning*,

302: 87~93.

- Okazaki, S. and S. Matsushita, 1993. A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. Proceeding of the International Conference in Engineering for Crowd Safety, 1993: 271~280.
- Pan, X., 2006. Computation modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Papadimitriou, E., G. Yannis and J. Golias, 2009. A critical assessment of pedestrian behaviour models. Transportation Research Part F, 12(3): 242~255.
- Pappis, C. and E. Mamdani, 1997. A fuzzy controller for a traffic junction. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 7(10): 707~717.
- Peeta, S. and J. Yu, 2002. A data-consistent fuzzy approach for online driver behavior under information provision. Transportation Research Record, 1803: 76~86.
- Peeta, S. and W. Zhou, 2004. Minimizing truck-car conflicts on highway. JTRP Technical Reports.
- Polus, A., J. Schofer and A. Ushpiz, 1983. Pedestrian flow and level of service. Journal of Transportation Engineering, 109(1): 46~56.
- Robin, T., G. Antonini, M. Bierlaire and J. Cruz, 2009. Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. Transportation Research Part B, 43(1): 36~56.
- Ross, T. J., 1995. Fuzzy logic with engineering applications. McGraw-Hill.
- Seneviratne, P. N. and J. F. Morral, 1985. Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. Transportation

- Planning and Technology, 10(2): 147~159.
- Seyfried, A., B. Steffen and T. Lippert, 2006. Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica A*, 368(1): 232~238.
- Tarawneh, M. S., 2001. Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors. *Journal of Safety Research*, 32(2): 229~236.
- Teknomo, K., 2002. Microscopic pedestrian flow characteristics: development of an image processing data collection and simulation model. Ph.D. thesis, Tohoku University.
- Teknomo, K., 2006. Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F*, 9(1): 15~27.
- Teodorovic, D. and S. Kikuchi, 1991. Application of fuzzy sets theory to the saving based vehicle routing algorithm. *Civil Engineering Systems*, 8(2): 87~93.
- Teodorovic, D., 1999. Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A*, 33(5): 337~364.
- Timmermans, H., X. Hagen and A. Borgers, 1992. Transportation systems, retail environments and pedestrian trip chaining behavior: Modelling issues and applications. *Transportation Research Part B*, 26(1): 45~59.
- Tsoukalas, L. H. and R. E. Uhrig, 1997. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. Wiley.
- Verlander, N. Q. and B. G. Heydecker, 1997. Pedestrian route choice: An empirical study. *Proceedings of the PTRC European Transport Forum*: 39~49.
- Washington State Department of Transportation, 1997. *Pedestrian facilities guidebook*.
- Weifeng, F., Y. Lizhong and F. Weicheng, 2003. Simulation of

- bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model. *Physica A*, 321(3-4): 633~640.
- Werner, T. and D. Helbing, 2003. The social force model applied to real life scenarios. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, Proceedings of the 2nd International Conference: 17~26.
- Zadeh, L. A., 1975. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8(3): 199~249.
- Zheng, X., T. Zhong and M. Liu, 2009. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, 44(3): 437~445.
- Zhu, W. and H. Timmermans, 2005. Exploring pedestrian shopping decision processes: an application of gene expression programming. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*: 145~154.



※ 각각의 요인에 대한 상세설명은 다음과 같습니다.

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리**

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 속도**

**보행자의 속도**

**보행자의 방향**

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 상대속도**

**보행자의 위치**

**보행자의 움직임**

**보행자의 자세**

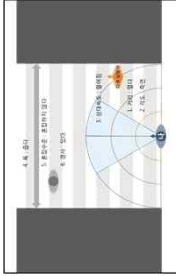
※ 다음의 요인, 가장상장에서 궤와 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 5점 척도로 응답해 주세요.

**응답 예 :** 다른 보행자 또는 장애물로 인해 불편함을 느껴 궤와 보행속도 또는 방향을 수정할 확률이 100%일 경우,

①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

5. (선행) 1) 다음의 가장상장에서 궤와 함께 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

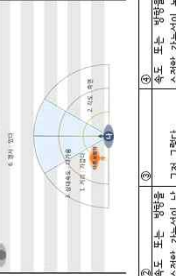
궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리가 같고, 궤의 속도에 다른 보행자 또는 장애물이 있으며, 다른 보행자 또는 장애물은 궤와 함께 걷는 방향으로 이동한다. 현재 보행길은 직선이며, 혹은 굽다. 그리고 응답하지 않다.



①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

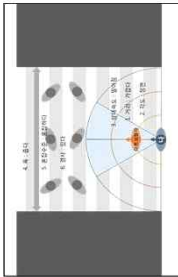
6. (선행) 2) 다음의 가장상장에서 궤와 함께 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리가 같고, 궤의 속도에 다른 보행자 또는 장애물이 있으며, 다른 보행자 또는 장애물은 궤와 함께 걷는 방향으로 이동한다. 현재 보행길은 직선이며, 혹은 굽다. 그리고 응답하지 않다.



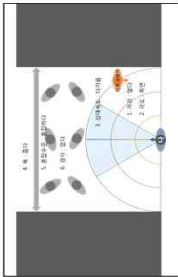
①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

7. (선택) 5. 다음의 가상실험에서 귀머가 원래 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
귀머와 다른 포행자(또는 장애물)의 거리가 가깝고, 귀머의 측면에 다른 포행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 포행자(또는 장애물)는 귀머에게 다가오는 방향으로 이동한다. 원래 포행자(또는 장애물)는, 혹은 멀리, 그리고 온  
은 가까이 있다.



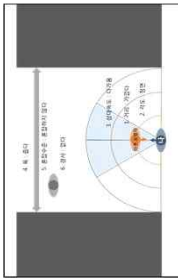
①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있 는 않는다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮 다.	그저 그렇다.	수정할 가능성이 높 다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

8. (선택) 5. 다음의 가상실험에서 귀머가 원래 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
귀머와 다른 포행자(또는 장애물)의 거리가 멀고, 귀머의 측면에 다른 포행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 포행자(또는 장애물)는 귀머에게 다가오는 방향으로 이동한다. 원래 포행자(또는 장애물)는, 혹은 멀리, 그리고 온  
은 가까이 있다.



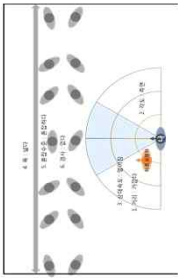
①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있 는 않는다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮 다.	그저 그렇다.	수정할 가능성이 높 다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

9. (선택) 5. 다음의 가상실험에서 귀머가 원래 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
귀머와 다른 포행자(또는 장애물)의 거리가 가깝고, 귀머의 측면에 다른 포행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 포행자(또는 장애물)는 귀머에게 다가오는 방향으로 이동한다. 원래 포행자(또는 장애물)는, 혹은 멀리, 그리고 온  
은 가까이 있다.



①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있 는 않는다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮 다.	그저 그렇다.	수정할 가능성이 높 다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

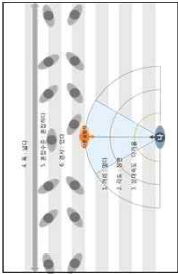
10. (선택) 5. 다음의 가상실험에서 귀머가 원래 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
귀머와 다른 포행자(또는 장애물)의 거리가 가깝고, 귀머의 측면에 다른 포행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 포행자(또는 장애물)는 귀머에게 다가오는 방향으로 이동한다. 원래 포행자(또는 장애물)는, 혹은 멀리, 그리고 온  
은 가까이 있다.



①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있 는 않는다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮 다.	그저 그렇다.	수정할 가능성이 높 다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

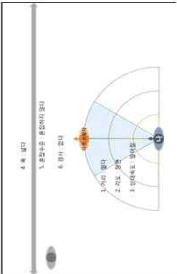


11. **상황** 기 다음의 가상상황에서 **귀하가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.**  
 귀하의 다른 보행자(또는 장애물)의 거리가 멀고, 귀하의 정면에 다른 보행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 보  
 행자(또는 장애물)는 귀하에게 다가오는 방향으로 이동한다. 현재 보행공간은 적당하며, 좁은 편다. 그리고 혼  
 잡이다.



① 수정할 가능성이 없 습니다.	② 수정할 가능성이 적 습니다.	③ 그저 그렇 습니다.	④ 수정할 가능성이 충 분 합니다.	⑤ 수정할 가능성이 매 우 높 습니다.
-------------------------------	-------------------------------	-----------------------	------------------------------------	---

12. **상황** 위 다음의 가상상황에서 **귀하가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.**  
 귀하와 다른 보행자(또는 장애물)의 거리가 멀고, 귀하의 정면에 다른 보행자(또는 장애물)가 있으며, 다른 보  
 행자(또는 장애물)는 귀하와 멀어지는 방향으로 이동한다. 현재 보행공간은 적당하며, 좁은 편다. 그리고 혼잡  
 하지 않다.



① 수정할 가능성이 없 습니다.	② 수정할 가능성이 적 습니다.	③ 그저 그렇 습니다.	④ 수정할 가능성이 충 분 합니다.	⑤ 수정할 가능성이 매 우 높 습니다.
-------------------------------	-------------------------------	-----------------------	------------------------------------	---

감사합니다.

## Abstract

# Modeling Pedestrian Movement Behavior based on Decision Making Process

Han, Myungjoo

Department of Environmental Planning  
Graduate School of Environmental Studies  
Seoul National University

Walking has come to be actively practiced as a sustainable and environment-friendly means. This has deepened the perception of the design and operation of pedestrian spaces. In addition, interest in pedestrian behavior has increased, and the need for a pedestrian space evaluation tool that reflects pedestrian behavior has emerged.

Pedestrian behavior is classified into strategic, tactical, and operational levels in accordance with pedestrian behavior selection stages (hierarchical structure of decision-making) and into the macroscopic approaches and the microscopic approaches in accordance with units of pedestrian analysis. Though research from the macroscopic approaches has been widely used, thanks to its simple model structure and ready applicability, it fails to consider the interactions among pedestrians. In recent years there has been active research from the microscopic approaches on individual pedestrian units, but most of these studies overlook that fact that pedestrian

behavior consists of pedestrians' decision-making process

This study developed a pedestrian movement behavior model that reflects individual pedestrian units' decision-making process, which is the basis of pedestrian behavior, and materialized on Pedestrian Simulator (P-Sim). P-Sim evaluates the pedestrian behavior at the strategic, tactical, and operational levels and therefore can be used effectively to evaluate pedestrian spaces.

The pedestrian movement behavior model in this study corresponds to the operational level and signifies individual pedestrian units' behavior of selecting the direction or speed. The pedestrian movement behavior model consists of five main characteristics. First, it realizes the microscopic behavior of individual pedestrian units. Second, pedestrians are intelligent agents who perform decision-making on their own. Third, this study used a fuzzy inference approach because pedestrian movement behavior is a decision-making process and is characterized by individuals' subjectivity, uncertainty, and ambiguity. Fourth, the impact range of pedestrian movement behavior is established with human vision as the standard. Finally, pedestrian movement behavior is classified into two stages: the decision-making level and the reaction level. The decision-making level consists of the process of deriving the modifiability of pedestrians' direction or speed in accordance with environmental factors and individual characteristics, and modifiability is calculated through the if-then rule, membership function, fuzzy operation, and defuzzification process. The reaction level consists of the process of realizing actual movement in consideration of modifiability at the decision-making level, and this study used the Social Force Model.

For a more sophisticated and objective pedestrian movement behavior model, this study constructed a pedestrian movement

behavior decision-making process based on SP surveys. A binary logit model was used, and, in accordance with the results of the analysis, pedestrians' individual characteristics (gender, age, purpose of the trip), social environmental factors (distances from obstacles, angles at which obstacles are located, relative velocity), and physical environmental factors (widths of pedestrian spaces) were selected as factors affecting pedestrian behavior. Based on the analysis result, the modifiability of pedestrians' direction or speed increased when: pedestrians were male rather than female; they were younger; they were on trips for business or work; their distances from obstacles were smaller; or they were directly faced with obstacles. Statistically significant variables were selected as the influence factors of fuzzy inference, and an if-then rule was generated through the relationship between the explanatory variables and the dependent variables. In addition, the researcher sought to construct a more realistic model by generating a membership function of fuzzy inference through an investigation of the pedestrian movement behavior characteristics and avoiding actual obstacles.

Finally, validation and evaluation were conducted by realizing the model developed on P-Sim and comparing the results with field investigation data. As for the field investigation data, video recordings of the pedestrian flow survey in Seoul in 2012 were used. The validation of the model consisted largely of comparisons of both characteristics of the macroscopic pedestrian traffic flow, which is an aggregate of individual data, and the individual pedestrian units' behavior. With the speed, density, and pedestrian traffic volume, which are characteristics of the macroscopic pedestrian traffic flow, the model and observational data were compared. In addition, the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Theil's

inequality coefficient were used as the evaluation indices here. As for the validation of the individual behavior, the distribution of both the speed and changes in the movement direction were calculated based on pedestrian trajectories, and the identity of distribution in both the model and observations were examined through validation. According to the results of the analysis, this model, which takes individual pedestrian units' decision-making process into consideration, was analyzed to explicate the characteristics and phenomenon of the macroscopic pedestrian traffic flow. The distribution of individual behavior likewise was identical for both the model and observations.

Admittedly, research on pedestrian traffic has been relatively marginalized in comparison with that on vehicular traffic in the field of transportation. The most basic means of transportation that humans can select, walking occurs at the beginning and end of all trips. In addition, walking performs the function of creating benefits in diverse aspects (individual, regional, and national levels) besides the field of transportation. Many have come to agree on the importance of walking in recent years and reflecting on such changes, this study developed a pedestrian movement behavior model for the microscopic analysis of pedestrian spaces. A model based on human thought, the model is expected to be overcome existing limitations and to be applicable in diverse ways to the stage of planning and operating pedestrian spaces. In addition, without being restricted simply to the capacity analysis of pedestrian spaces, it is expected to be able to analyze the various and subtle effects of changing pedestrian spaces, such as the effects of introducing new pedestrian facilities or pedestrian policies.

**Keywords:** pedestrian movement behavior, decision-making

process, Fuzzy Inference, Social Force Model, binary  
logit model, pedestrian simulator

*Student Number: 2006-31010*



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 박사학위논문

보행자의 의사결정과정을 고려한  
이동행태모형 개발

2016년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과

한 명 주



# 보행자의 의사결정과정을 고려한 이동행태모형 개발

지도교수 이 영 인

이 논문을 도시계획학 박사학위논문으로 제출함  
2015년 10월

서울대학교 환경대학원  
환경계획학과  
한 명 주

한명주의 도시계획학 박사학위논문을 인준함  
2016년 1월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 국문초록

지속가능한 친환경 수단으로 보행이 활성화되면서 보행공간에 대한 계획 및 운영이 중요하게 인식되고 있다. 이와 함께 보행행태에 대한 관심이 증가하고, 보행행태를 반영한 보행공간 평가 툴의 필요성이 대두되었다.

보행행태는 보행행태 선택단계에 따라 전략, 전술, 실행단계로 구분되며, 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다. 거시적 관점의 연구는 모형구조가 단순하고 적용이 용이하여 널리 활용되었으나, 보행자 간 상호작용을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이에 최근 개별보행자 단위의 미시적 관점 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 대부분 연구가 보행행태가 보행자의 의사결정과정이라는 사실을 간과하고 있다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정이 반영된 보행이동행태모형을 개발하고, 이를 보행자 시뮬레이터(P-Sim)에 구현하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하여, 보행공간의 분석에 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당하고, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 다루고 있다. 보행이동행태모형은 크게 5가지 특성을 가지고 있다. 첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현하며, 둘째, 본 모형의 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 셋째, 보행이동행태는 의사결정과정이며, 개인의 주관성, 불확실성, 애매함 등 특성을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 퍼지추론 접근 방식을 활용하였다. 넷째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 마지막 특성으로 보행이동행태는 의사결정단계와 실제 행동단계 2가지로 구분된다. 의사결정단계는 환경적 요인, 개별특성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는 과정이며, 이때 수

정가능성은 IF-THEN 규칙, 소속도 함수, 퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 산정된다. 실제행동단계는 의사결정단계의 수정가능성을 고려하여 실제 이동을 구현하는 과정으로, 본 연구에서는 널리 활용되고 있는 Social Force Model를 이용하였다.

보다 정교하고 객관적인 보행이동행태모형을 위해, 본 연구에서는 설문조사에 근거하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 이항로짓 모형을 이용하였고, 분석결과, 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 보행자 개별특성(성별, 연령, 통행목적), 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도), 물리적 환경 요인(보행공간의 폭)이 선정되었다. 남성이 여성보다, 연령이 적을수록, 업무통행일수록 또한 장애물과의 거리가 가까울수록, 장애물이 정면에 위치할수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높아지는 것으로 분석되었다. 통계적으로 유의미한 변수를 퍼지추론의 영향요인으로 선정하고, 설명변수와 종속변수 간 관계를 통해 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 또한 실제 장애물을 회피하는 보행이동행태 특성 조사를 통해 퍼지추론의 소속도 함수를 생성하여, 보다 현실적인 모형을 구축하고자 하였다.

마지막으로 개발된 모형을 P-Sim에 구현하고 현장조사자료와의 비교를 통해 검증 및 평가를 수행하였다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였다. 모형의 검증은 크게 개별자료가 집계된 거시적 보행교통류 특성비교와 개별보행자 단위의 행태비교로 구성된다. 거시적 보행교통류 특성인 속도, 밀도, 보행교통량을 대상으로 모형과 관측자료를 비교하고, 이때 평가지표는 RMSE, MAE, Theil의 부등계수를 사용하였다. 개별행태 검증은 보행자 궤적을 토대로 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 산정하고, 모형과 관측 분포의 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 살펴보았다. 분석결과, 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 본 모형이 거시적 보행교통류 특성을 설명하는 것으로 판명되었고, 개별행태 역시 관측과 동일한 분포를 보이는 것으로 조사되었다.

교통분야에서 차량교통에 비해 보행교통 연구는 상대적으로 소외되어 온 것이 사실이다. 보행은 인간이 선택할 수 있는 가장 기본적인 교통수

단으로써 모든 통행의 시작과 끝을 담당하고 있다. 또한 보행은 교통분야 외 다양한 측면(개인, 지역, 국가 차원)에서 편익을 창출하는 기능을 수행한다. 최근 보행의 중요성에 많은 사람들이 공감하고 있고, 이러한 변화와 함께 본 연구에서는 보행공간의 미시적 분석을 위한 보행이동행태모형을 개발하였다. 본 모형은 개별보행자 단위의 행태를 반영하고 인간의 사고에 기반을 둬으로써 기존 모형의 한계를 극복한 점에 있어서 의미가 있다. 이를 기반으로 보행공간의 계획 및 운영단계에서 다양하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 단순히 보행공간의 용량분석에 제한되지 않고, 새로운 보행시설 또는 보행정책의 도입 시 다양하고 미세한 보행공간 변화를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 보행이동행태, 의사결정과정, 퍼지추론, 사회역학모형, 이항로짓모형, 보행시뮬레이션

**학 번:** 2006-31010

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구 배경 및 목적 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	4
제 2 절 연구 내용 및 구성 .....	5
제 2 장 이론적 배경과 선행연구 고찰 .....	8
제 1 절 보행행태 .....	8
1. 보행자 공간 .....	8
2. 보행특성 .....	10
제 2 절 지적 행위자 .....	16
1. 지적 행위자의 개념 .....	16
2. 계층적 의사결정과정 .....	18
제 3 절 선행연구 고찰 .....	20
1. 보행 연구 분류 .....	20
2. 보행행태 연구 .....	22
3. 보행공간 연구 .....	41
4. 선행연구의 시사점 .....	43
제 3 장 보행이동행태모형 개발 .....	45
제 1 절 보행이동행태 정의 .....	45
제 2 절 보행이동행태모형 구축 .....	50
1. 모형식 설정 .....	51

2. 보행이동행태 의사결정요인 선정 .....	54
3. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 .....	56
<b>제 4 장 보행이동행태모형 정산 .....</b>	<b>69</b>
제 1 절 보행이동행태 의사결정요인 선정 .....	69
1. 보행이동행태 선호조사 .....	69
2. 보행이동행태 의사결정요인 선정결과 .....	79
제 2 절 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 .....	86
1. IF-THEN 규칙 .....	87
2. 소속도 함수 .....	89
3. 퍼지연산 및 비퍼지화 .....	101
4. 가중치 적용 .....	102
<b>제 5 장 모형 구현 및 검증 .....</b>	<b>105</b>
제 1 절 검증방법론 .....	105
1. 분석시나리오 .....	106
2. 평가지표 .....	108
제 2 절 자료 구축 .....	111
1. 관측 자료 .....	111
2. 모형추정 자료 .....	118
제 3 절 검증 결과 .....	130
1. 거시적 보행교통류 특성 .....	130
2. 미시적 개별행태 .....	136
<b>제 6 장 결론 .....</b>	<b>140</b>
제 1 절 연구결과의 요약 및 시사점 .....	140
제 2 절 한계 및 향후 연구 과제 .....	142

참고문헌 .....	144
부록: 설문조사 .....	156
Abstract .....	160

## 표 목 차

<표 2-1> 성별, 연령별 평균 보행속도 .....	13
<표 2-2> 보행자 여건별 평균 보행속도 .....	14
<표 2-3> 보행 연구 분류 .....	21
<표 2-4> 보행자도로 서비스수준 .....	27
<표 2-5> 보행자 움직임 관련 선행연구 분류 .....	33
<표 3-1> IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부 .....	64
<표 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인 .....	70
<표 4-2> 보행이동행태 기타 영향요인 .....	72
<표 4-3> 보행이동행태 선호조사 개요 .....	73
<표 4-4> 보행이동행태 의사결정요인 변수설정 .....	75
<표 4-5> 영향요인과 수준설정 .....	75
<표 4-6> 보행이동행태 선호조사를 위한 시나리오 .....	76
<표 4-7> 응답자 특성 조사 결과 .....	77
<표 4-8> 시나리오별 수정가능성 응답결과 .....	78
<표 4-9> 로짓모형의 설명변수 설정 .....	79
<표 4-10> 이항로짓모형의 종속변수 설정 .....	81
<표 4-11> 로짓모형 추정결과 .....	83
<표 4-12> 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화 ·	84
<표 4-13> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화 ·	85
<표 4-14> IF-THEN 규칙 생성 .....	88
<표 4-15> 회피시작 시점에서 장애물과의 거리, 각도 특성 .....	93
<표 4-16> 거리, 각도 간 상관관계 .....	94
<표 4-17> 요인변수와 회피시작 시점의 이동방향 변화량 간 상관관계	95
<표 4-18> 퍼지변수 설정 .....	97



<표 4-19> 연령 변수의 소속도 함수 .....	98
<표 4-20> 장애물과의 거리 변수의 소속도 함수 .....	98
<표 4-21> 장애물이 위치한 각도 변수의 소속도 함수 .....	99
<표 4-22> 보행공간의 폭 변수의 소속도 함수 .....	99
<표 4-23> 상대속도 변수의 소속도 함수 .....	100
<표 4-24> 보행자 방향 또는 속도 수정가능성 변수의 소속도 함수 ..	100
<표 4-25> 변수의 가중치 설정 .....	103
<표 5-1> 모형의 검증 대상 .....	106
<표 5-2> 5분 단위 관측자료의 보행교통류 특성 및 서비스수준 ..	107
<표 5-3> 분석시나리오 설정 .....	108
<표 5-4> 유동인구 영상촬영조사의 시, 공간적 범위 .....	111
<표 5-5> 유동인구 영상자료 조사내용 .....	113
<표 5-6> 관측자료의 거시적 보행교통류 특성 .....	115
<표 5-7> 시나리오별 보행속도 분포의 정규성 검정 .....	115
<표 5-8> 관측자료의 미시적 개별행태 특성 .....	117
<표 5-9> P-Sim의 효과척도 산출 .....	125
<표 5-10> P-Sim의 입력자료 확인 .....	126
<표 5-11> 보행 OD 구축 .....	127
<표 5-12> 모형의 검증결과 .....	133
<표 5-13> 모형과 관측 간 속도 분포 동일성 검정 .....	137
<표 5-14> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 검정 .....	139

## 그 립 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도 .....	7
<그림 2-1> 보행자 공간 .....	9
<그림 2-2> 보행 목적에 따른 공간적 요구 차이 .....	10
<그림 2-3> 보행속도-밀도-보행량 관계 그래프 .....	11
<그림 2-4> 개별특성에 따른 보행교통류 차이 .....	15
<그림 2-5> 보행과 복잡계 .....	16
<그림 2-6> 함수, 객체, 행위자 간 관계 .....	17
<그림 2-7> 계층적 의사결정구조 .....	19
<그림 2-8> 행태에 변화를 가져오는 과정 .....	19
<그림 2-9> 보행 연구 분류 .....	21
<그림 2-10> 보행공간 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행) .....	29
<그림 2-11> Social Force Model에서 Social Force의 상호작용 .....	37
<그림 2-12> Magnetic Force Model의 감·가속도 .....	39
<그림 2-13> MSPM의 척력 .....	40
<그림 3-1> 보행이동행태의 위계 .....	45
<그림 3-2> 보행이동행태의 지적 행위자 .....	46
<그림 3-3> 보행이동행태의 단계 .....	47
<그림 3-4> 보행이동행태의 영향범위 .....	48
<그림 3-5> 보행이동행태 영향범위와 상호작용 .....	49
<그림 3-6> 실제행동단계와 의사결정단계의 상호연관성 .....	51
<그림 3-7> 일반집합(고전적 집합)과 퍼지집합의 특징 .....	57
<그림 3-8> 소속도 함수의 형태 .....	58
<그림 3-9> 퍼지집합이론을 이용한 언어적 변수의 정량화 .....	59

<그림 3-10> 퍼지추론 과정 .....	60
<그림 3-11> 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정 .....	63
<그림 3-12> Mamdani type의 퍼지추론 연산 .....	66
<그림 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인 .....	74
<그림 4-2> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 .....	85
<그림 4-3> Matlab의 이동물체 검지 .....	91
<그림 4-4> 영상자료 분석을 위한 보행특성변수 .....	92
<그림 4-5> 회피시작 시점에서 거리와 각도 관계 .....	94
<그림 4-6> 요인변수와 이동방향 변화량 관계 .....	95
<그림 4-7> 장애물까지 거리와 수정가능성 관계 .....	96
<그림 4-8> 장애물이 위치한 각도와 수정가능성 관계 .....	96
<그림 4-9> 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성 도출과정 ..	101
<그림 4-10> 조건부 속성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성	104
<그림 5-1> 관측자료의 속도-밀도 관계 .....	107
<그림 5-2> 검증방법론 .....	110
<그림 5-3> 영상조사지점도 .....	112
<그림 5-4> 시나리오별 거시적 보행교통류 특성 .....	114
<그림 5-5> 개별보행자 궤적 .....	116
<그림 5-6> 관측자료의 개별행태 특성 .....	117
<그림 5-7> 시뮬레이션 단계 .....	118
<그림 5-8> P-Sim의 객체지향 프로그래밍 기본 구성요소 .....	119
<그림 5-9> P-Sim의 클래스 위계 .....	120
<그림 5-10> 시뮬레이션 구조도 .....	121
<그림 5-11> P-Sim의 보행공간 정의 .....	123
<그림 5-12> P-Sim의 실행화면 .....	125
<그림 5-13> 시뮬레이션 네트워크 구성 .....	128
<그림 5-14> 모형추정자료의 보행교통류율, 속도, 밀도 관계 .....	129

<그림 5-15> 모형-관측 간 거시적 보행교통류 특성 비교 .....	131
<그림 5-16> 모형과 관측의 속도-밀도 관계 .....	134
<그림 5-17> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 1) .....	135
<그림 5-18> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 2) .....	135
<그림 5-19> 시나리오별 속도 분포 차이 .....	136
<그림 5-20> 모형과 관측 간 속도 분포 비교 .....	137
<그림 5-21> 시나리오별 이동방향 변화량 분포 차이 .....	138
<그림 5-22> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 비교 .....	139

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 배경 및 목적

### 1. 연구 배경

보행은 인간의 가장 기본적이고 기초적인 이동수단으로 모든 활동의 기반이 된다. 또한 지역공동체 구성원들을 다양한 사회·경제·문화적 기회들로 연결해주는 역할을 하고, 보다 건강하고 지속가능한 도시생활을 위한 필수적인 활동으로 인식되고 있다(오성훈·남궁지희, 2011). 교통측면에서 보행은 단거리 이동에서 그 자체가 교통수단이 되고, 비교적 장거리 이동에서는 승용차, 버스, 철도 등 다른 교통수단에 접근하는 보조적 수단이며, 수단간 연계기능을 담당한다. 즉, 보행은 가장 높은 수준의 접근성을 가지는 수단이다. 국토교통부(2011a)에 따르면, 전국 평균 보행의 수단 분담률은 32.0%로, 승용차 수단 분담률 32.1%에 이어 두 번째로 높다.<sup>1)</sup> 또한 보행은 교통수단 역할 이외에도 여가를 즐기거나 건강을 증진시키기 위한 수단이 되기도 한다. 최근 삶의 질과 친환경성이 강조됨에 따라 보행의 중요성은 더욱 강조되고 있다.

보행은 도시 내에서 기초적이고 핵심 교통수단임에도 불구하고 교통분야에서 다른 교통수단(승용차, 버스, 철도 등 차량 교통)에 비하여 관심이 부족한 실정이다. 또한 보행환경 개선을 위한 정책 및 투자 역시 소극적인 편이다. 보행자 통행보다 차량 통행을 우선하는 정책이 시행되어 왔으며 육교, 지하도 등 보행자를 배려하지 않는 시설이 설치되기도 하

---

1) 서울, 부산, 대구, 광주, 대전 등 대도시의 보행교통 수단 분담률은 승용차의 수단 분담률보다 높은 것으로 나타났다. 여기서, 보행 수단 분담률 산정은 5분 이상 통행을 기준으로 하였으며, 환승통행은 제외되며, 5분 이하의 통행이라도 통근이나 통학의 경우는 통행으로 인정된다.

었다. 또한 고가도로, 복개도로 설치 등 차량 위주의 시설 투자 사업이 활발하게 진행되었고, 교통신호체계 역시 지체최소화, 연동최적화 등 차량의 통행을 위주로 계획되었다. 이러한 차량 위주의 계획은 보행자를 한정된 좁은 공간으로 고립시켜 다양한 활동이나 시각적 즐거움을 제한하게 되었다. 즉, 보행자 및 사람을 배려하지 못하는 자동차 중심의 교통 정책 위주로 도시는 활발히 성장하여왔다.

최근 지속가능한 녹색교통정책의 흐름이 대두되고, 가치관이 변화하면서 비동력 교통수단(non-motorized transport)의 하나인 보행에 대한 재조명이 요구된다. 지속가능한 도시교통을 위한 기본적 토대가 되는 교통수단으로, 지역공동체 구성원들의 사회적·경제적·문화적 기회 매개체로, 도시 생활을 위한 필수적인 활동으로 보행이 점차 중요하게 여겨지고 이에 대한 인식의 전환이 필요하다. 또한 삶의 질 향상에 대한 요구가 커지면서, 사람중심의 교통체계, 건강을 중시하는 교통체계가 주목받고 있으며, 보행을 하나의 운동으로 보고, 건강한 도시 만들기의 중요한 요소로 인식되고 있다.

차량 위주에서 보행자 배려, 친환경 교통체계로 패러다임이 변화하면서 보행의 중요성과 함께 안전하고 편리하고 쾌적한 보행공간을 만들고자 하는 노력이 생겨나고 있다. 이동하기 위한 보행공간 뿐 아니라 머무는 대상공간, 즉 목적이 되는 보행공간으로 가치가 변화함에 따라 보행공간을 조성하고, 개선하고자 하는 역할이 점차 중요해지고 있다. 보행공간, 보행시설 등 보행환경 조성이 활발하게 이루어지고 있다. 전통적 보행공간 계획인 네덜란드 본엘프(Woonerf)를 시작으로 최근에는 뉴욕의 보행공간 확대 프로젝트, 런던의 보행자 중심 환경 조성, 파리의 자동차도로 폐쇄, 보행 전용공간 설치 등 해외 주요 도시들도 보행 중심, 친환경 위주의 교통정책 방향을 설정하고 있다(서울특별시, 2014a).

보행공간을 계획하고 운영하기 위해서는 보행자와 보행교통에 대한 이해가 우선되어야 한다. 또한 최근 추진되고 있는 다양한 보행관련 계획과 정책 사업을 평가하기 위한 보행공간 평가 틀이 필요하다. 이러한 평가 틀은 보행행태를 반영하여야 하며, 실제 보행자의 움직임을 정확히

모사하여야 한다. 또한 실제 현상을 분석할 수 있고, 보행환경에 미치는 영향을 분석하고 예측할 수 있어야 한다.

보행자의 움직임, 즉 보행행태는 보행자의 의사결정과정을 거쳐 발현된다. 의사결정과정은 계층적 구조를 가지며, 전략단계(strategic level), 전술단계(tactical level), 실행단계(operational level)로 구분 가능하다(Hoogendoorn et al., 2002). 첫째 전략단계는 보행 시작 이전에 출발시각 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 의사결정 단계를 의미한다. 둘째 전술단계는 활동스케줄링 및 중간목적지선택, 경로선택 등 의사결정을 수행하는 단계이다. 마지막으로 실행단계는 보행자가 실제로 주변 미시적 환경(장애물, 다른 보행자 등)과의 상호작용(interaction)을 수행하는 단계로, 보행이동행태(walking behavior)가 대표적이다. 특히, 실행단계의 보행이동행태는 계층적 구조를 가진 보행자 행태모형의 기초가 된다.

보행행태는 보행자와 공간의 다양성, 복잡성 등으로 인해 개별행태를 모형화하기는 어려우며, 특히 순간적으로 이루어지는 실행단계의 미시적 보행행태를 예측하는 것은 어렵다. 이러한 이유로 실행단계에 대한 연구는 전략단계, 전술단계의 연구에 비해 상대적으로 부족한 편에 속한다. 또한 실행단계에 속하는 보행이동행태에 관한 연구 중 상당수는 보행자 집단을 하나의 동질적이고 연속된 흐름으로 보고, 집계적 속성으로 분석하는 거시적 관점(macroscopic approaches)의 연구이다. 거시적 관점의 연구는 적용의 용이성 등의 이유로 광범위하게 사용되고 있으나, 보행자간, 보행자와 장애물간 상호작용을 고려하기에는 한계가 있다는 문제점을 가지고 있다. 최근 컴퓨터 기술 등의 발달로 인해 보행자 개별행태를 반영하고자 하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 개별보행자 단위(microscopic approaches)로 행태가 세분화될수록 보행행태에 영향을 미치는 요인은 다양해지며, 이를 반영하는 것은 매우 복잡해지는 어려움이 존재하나, 현실을 정확히 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

## 2. 연구 목적

지속가능한 친환경 수단으로 보행이 활성화되고 보행환경 조성 및 개선사업이 활발히 추진되면서 보행공간 계획과 운영이 중요하게 인식되고 있다. 이와 더불어 보행자의 움직임에 대한 메커니즘 즉, 보행행태에 대한 관심이 증가하고 보행공간 평가 툴의 필요성이 대두되었다.

보행행태 연구는 최근 보행인식변화와 함께 활발히 진행되고 있으나, 보행이동행태를 다루는 하위개념의 실행단계 연구는 행태의 복잡성으로 타 보행관련 연구에 비해 상대적으로 부족한 실정이다. 대다수 기존 연구는 보행행태를 하나의 동질적 흐름으로 보는 거시적 관점으로, 개별보행자 단위의 상호작용을 반영하지 못한다. 일부 개별보행자 단위의 연구가 기술발달과 함께 활발히 논의 중이나 단순히 주변 환경과의 상호작용만을 고려하고, 보행자의 의사결정과정을 간과한 모형들이 대부분이다.

따라서 본 연구는 기존 연구의 문제점을 개선하기 위한 실행단계의 미시적 보행이동행태모형을 개발하고자 한다. 여기서 ‘미시적’은 첫째, 계층적 의사결정구조 중 하위단계인 실행단계에 해당한다는 점과 둘째, 개별보행자 단위의 이동행태모형이라는 것을 의미한다. 본 연구의 보행이동행태모형은 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 방향 또는 속도 선택 행태를 의미한다. 또한 보행자 집단을 하나의 동질적 요소로 여기는 것이 아니라, 보행자를 자율성(autonomy)을 가진 하나의 지적 행위자(intelligent agent)로 보고 개개인의 독자적 특성을 반영하여 집단 전체의 흐름보다는 개별보행자의 움직임과 상호작용을 중심으로 모형을 구축한다.

이러한 과정은 보행자의 주관적인 효용을 최대로 하는 의사결정과정임과 동시에, 보행행태에 영향을 미치는 요인은 주관성, 부정확성, 애매함 등의 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 보행행태의 이런 특성을 토대로 보행이동행태모형에 퍼지추론(Fuzzy Inference) 과정을 적용한다. 퍼지추론은 애매하고 부정확한 과정을 정량화하는 기능을 가지고 있고, 불확실성하에서 인간의 의사결정을 모형화하는데 장점이 있다(Ross, 1995).



본 연구의 보행이동행태모형은 인간의 사고에 기반을 둔 의사결정과정을 모형에 포함함으로써, 기존 연구에서 고려되지 못한 인간의 사고를 모형에 구현하고자 한다.

보행이동행태 외 보행공간의 계획 및 운영 대안의 평가를 위해 보행공간의 시설물 이용행태, 대기행태 등을 포함한 P-Sim(보행자 시뮬레이터)<sup>2)</sup>에 본 모형을 구현하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하며, 보행공간 분석에 유용하게 활용될 수 있다. 또한 현장자료와의 검증이 부족한 기존모형의 한계를 극복하기 위해 실제 보행행태와 비교, 분석을 수행하여 모형의 신뢰성을 향상시키고자 한다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 거시적 보행교통류 특성과 개별보행자 단위의 행태 비교를 수행하였다.

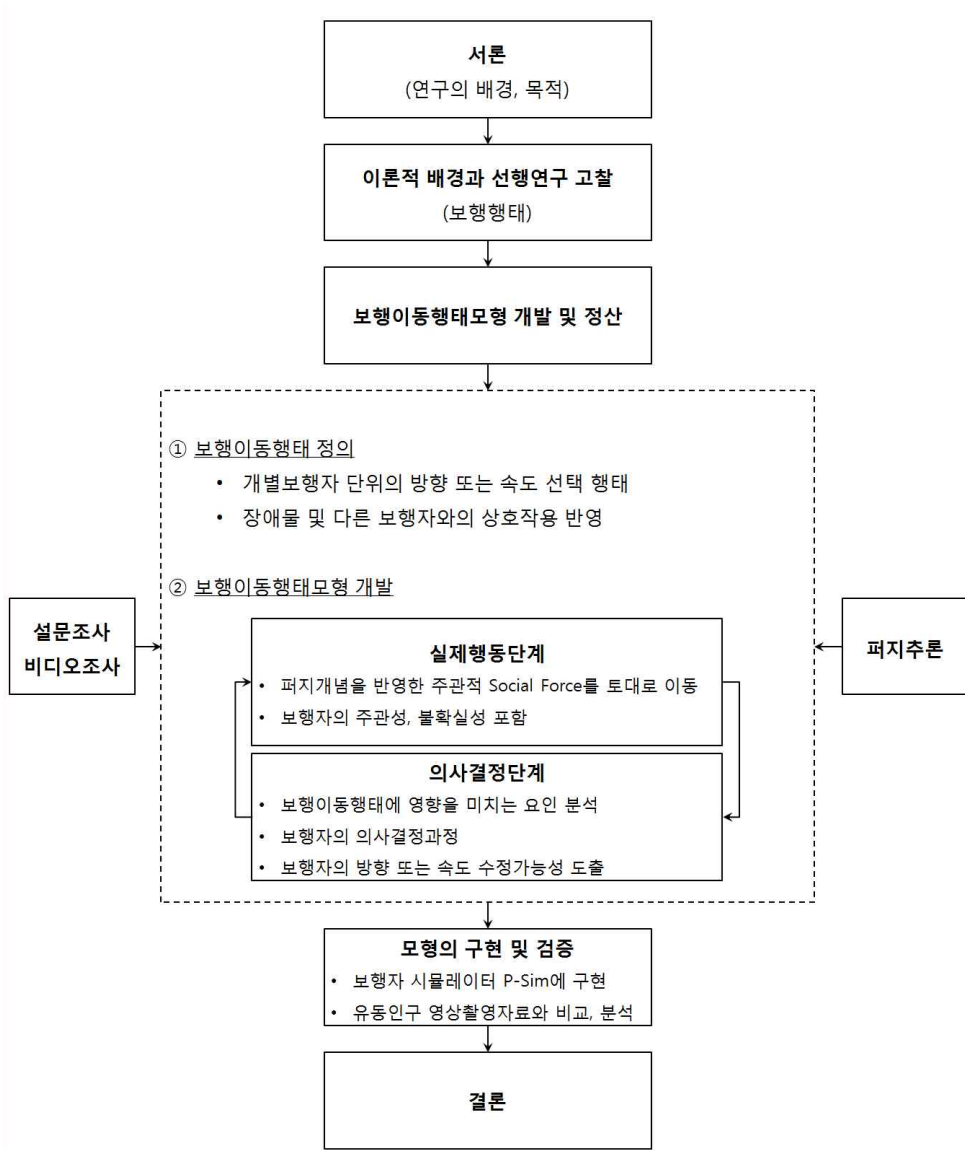
## 제 2 절 연구 내용 및 구성

본 연구는 크게 개별보행자 단위의 보행이동행태모형 개발과 개발된 모형을 보행자 시뮬레이터에 구현하고 현장조사와의 비교를 통해 검증하는 내용으로 구분되며, 총 6장으로 구성된다. 1장에서는 보행이동행태모형의 필요성과 본 연구의 목적을 언급하고, 2장에서는 보행행태에 관한 선행연구를 검토한다. 보행행태는 보행행태 선택단계에 따라 전략, 전술, 실행단계로 구분되며, 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다. 3장은 모형개발 방법론으로, 모형개발에 앞서 먼저 보행이동행태를 정의한다. 또한 보행자 개별특성, 보행공간 특성 등 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 분석한다. 보행자의 보행이동행태는 크게

---

2) P-Sim은 Pedestrian Simulator의 약자로, 국가교통 R&D과제 ‘교통연계 및 환승시스템 기술개발’을 통해 개발된 보행자 시뮬레이터이다(국토교통부, 2011b). P-Sim의 개요 및 간략한 기능은 본 논문 pp. 118~126에서 제시하고 있다.

두 가지로 구분되는데, 첫 번째는 자율성을 가진 보행자가 주변 환경으로부터 영향을 받아 판단을 내리는 보행이동행태 의사결정단계이며, 두 번째는 의사결정을 기반으로 실제 행동을 이행하는 단계이다. 이때 의사결정단계와 실제행동단계는 서로 영향을 미친다. 보행이동행태는 보행자의 의사결정과정임과 동시에 보행자의 주관성, 불확실성 특성을 가지므로 퍼지추론을 기반으로 구현된다. 4장은 3장에서 제시된 모형의 정산과정을 포함하고 있으며, 보다 객관적인 모형을 구축하기 위하여 개별행태 모형과 보행행태자료를 활용한다. 5장에서는 3, 4장에서 개발한 보행이동행태모형을 보행자 시뮬레이터인 P-Sim에 적용하여 보행공간을 분석하는 툴을 구현하고 관측 자료와의 비교를 통한 모형의 평가와 검증을 수행한다. 6장에서는 연구 요약 및 시사점을 제시하고 향후 연구 과제를 도출한다. 본 연구의 흐름도는 <그림 1-1>과 같다.



<그림 1-1> 연구 흐름도

## 제 2 장 이론적 배경과 선행연구 고찰

### 제 1 절 보행행태

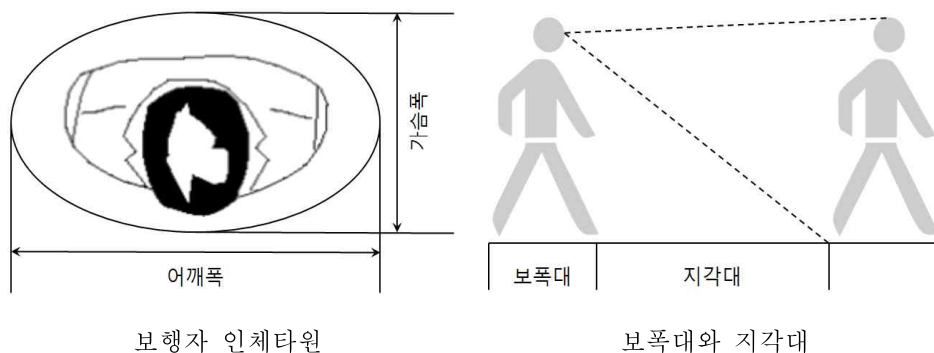
#### 1. 보행자 공간

보행행태를 이해하기 위해서는 보행자 공간에 대한 고려가 선행되어야 한다. 즉, 보행자가 필요로 하는 공간적 요구의 실체와 다양성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 보행자가 필요로 하는 공간은 보행자 신체가 점유하는 물리적 공간과 심리·경험적 측면으로 결정되는 사적영역인 완충공간(buffer zone)으로 구분된다(Fruin, 1971). 먼저 물리적 공간인 인체타원(body ellipse)은 보행자의 몸 두께와 어깨 폭 치수로, 보도 등에서 보행용량을 결정하고 보행공간이나 보행자를 위한 시설을 계획할 경우 기본적인 요소이다. 국가기술표준원(2004)는 20세 이상 한국인의 표준체형을 어깨너비 37.4cm, 가슴두께 20.6cm로 제시하고 있다. Fruin (1971)은 보행공간의 설계기준으로 폭 60cm, 두께 45cm인 인체타원을 제시하였으며, 이는 평균 인체 치수의 1.5~2배이다. 한편, 휠체어, 유모차를 이용하는 사람은 일반 보행자의 인체타원보다 상당히 큰 물리적 공간을 점유한다. 교통약자를 배려한 보행공간을 조성하기 위해서는 다양한 계층의 보행자 인체타원에 대한 고려가 필요하다.

완충공간은 보행자의 개인적인 공간으로 충돌을 피하기 위한 여유 공간의 개념이다. 보행자의 인지나 심리적인 측면이 완충공간에 영향을 주며, 완충공간은 보행자의 성별, 연령, 문화적 배경에 따라 다양하게 나타날 수 있다. Hall (1966)은 완충공간과 같은 개인적 공간이 관계의 친밀도나 개인의 특성에 따라 달라진다고 보고, 밀접거리(intimate distance), 개체거리(personal distance), 사회거리(social distance), 공중거리(public distance) 등 4가지 대인거리의 유형을 분류하였다. 먼저, 밀접거리는 46

cm 이하 거리에 해당하며 신체접촉과 속삭임이 가능한 거리로, 모든 감각이 밀착되어 불쾌감을 줄 수 있는 거리이다. 개체거리는 어느 정도의 친밀함이 전제되어 있어서 일상적 대화가 이루어지는 거리로 정의된다. 사회거리는 사무적 대화가 이루어지는 거리로 122~366cm 범위 내를 포함하며, 공중거리는 연설, 강의 등 공적인 발언이 이루어지는 거리로 366cm 이상으로 분류된다.

또한 보행동작에 필요한 공간은 보폭대(pacing zone)와 지각대(sensory zone)로 구성된다. 보폭대는 보행동작을 연속적으로 수행하기 위해 확보해야하는 최소거리로, 보행속도에 비례하며 직접 측정이 가능하다. 지각대는 보행이동행태를 위해 공간과 주변 상황을 지각하고 판단하기 위한 적정거리이다. 또한 시각 등 여러 가지 지각이나 심리적인 영향을 받을 수 있다. 인간의 눈은  $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 의 원추형 범위 내에서는 작고 상세한 것까지 볼 수 있으며, 일반적으로 사물을 쾌적하게 볼 수 있는 시야한계는  $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 이다. 계단이나 에스컬레이터를 이용하는 경우 시야가 좁아지며, 또한 다른 보행자의 머리부터 발끝까지 시야를 확보하려면 상대방에서 2m 정도 떨어질 필요가 있다. 지각대의 공간을 결정하는 요소는 인지반응시간인데, 이는 보행자에 따라 다를 수 있다(Fruin, 1971).



자료: Fruin(1971).

<그림 2-1> 보행자 공간

보행공간의 간격(spatial bubble)은 <그림 2-2>과 같이 보행목적에 따라 다양하다(Harris and Dines, 1988; WSDOT, 1997; 오성훈·남궁지희, 2011). 여기서 ‘간격’은 보행 중 장애물로 인해 전방 시야를 제한받지 않는 거리를 의미한다. 평상시 요구되는 보행공간의 간격은 4.6~5.5m 이나 쇼핑통행의 경우 2.8~3.6m, 산책은 10.6m 이상으로 통행목적에 따라 공간적 요구의 차이는 다양하다.



자료: Harris and Dines(1988).

<그림 2-2> 보행 목적에 따른 공간적 요구 차이

## 2. 보행특성

### 1) 보행자와 차량의 차이

보행자의 움직임은 차량에 비해 다양하고 복잡한 특성을 가지고 있다. 차량은 신호, 교통표지 등 도로의 각종 제어시설에 의한 특정 규칙을 기반으로 운행된다. 반면, 보행자는 동력에 의존하지 않고 자신의 신체를 통해 이동하므로 차량에 비하여 자율성과 임의성이 크고, 독자적이며 유연한 행태를 보인다. 또한 차량은 도로와 같이 물리적으로 한정된 공간에서 이동하는 반면 보행은 정해진 경로가 없다. 보행이 이루어지는 공간은 단순한 보도는 물론, 횡단보도, 광장, 지하철 환승역, 건물 내 보행

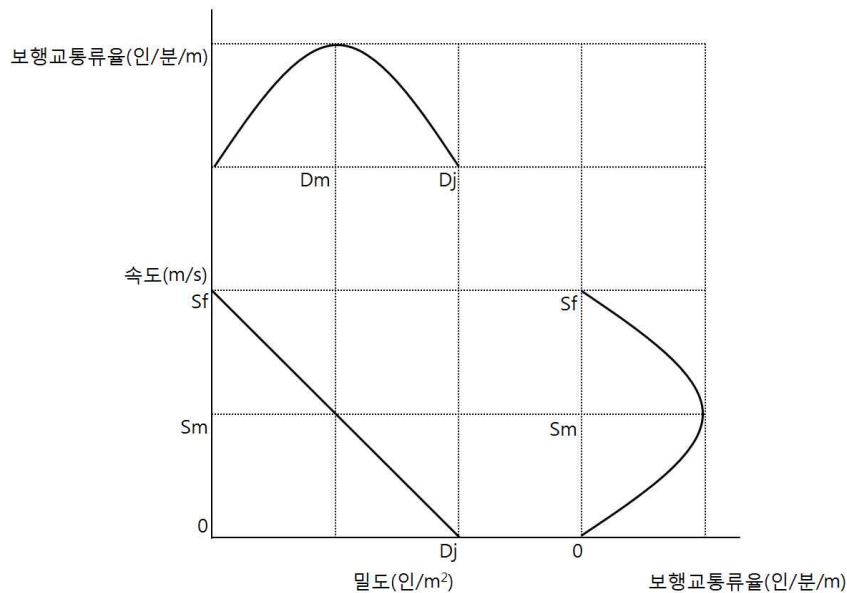
공간 등으로 다양하게 구성된다.

보행속도는 보행자의 특성(성비, 연령비 등), 보행목적, 보행공간, 보행 시간대(첨두시, 비첨두시), 보행환경(환승, 각종 이벤트, 긴급대피상황 등) 등에 따라 편차가 큰 것으로 조사되고 있다(Daamen, 2004). 또한 보행속도의 가·감속은 차량보다 상대적으로 크다. 따라서 보행에 대한 연구는 차량교통 연구와는 다른 접근 방법이 필요하다(이종호, 2008; Papadimitriou et al., 2009).

## 2) 거시적 특성

보행행태의 거시적 특성변수는 기본적으로 보행교통류율(인/분/m)  $V$ , 속도(m/분)  $S$ , 밀도(인/m<sup>2</sup>)  $D$ 이며, 관계식은 [식 2-1]과 같다.

$$V = S \times D \quad \text{[식 2-1]}$$



<그림 2-3> 보행속도-밀도-보행량 관계 그래프

여기서,  $S_f$ 는 자유속도(밀도가 0일 때의 속도),  $S_m$ 는 임계속도(용량에 도달했을 때의 속도),  $D_m$ 는 임계밀도(용량에 도달했을 때의 밀도),  $D_j$ 는 혼잡밀도(모든 이동이 정지하는 밀도)를 의미한다.

일반적으로 보행량과 밀도가 증가하면 보행속도는 감소하고, 보행밀도가 증가하여 1인당 차지하는 보행공간이 감소하면, 보행자의 이동성이 떨어지면서 전체적인 보행흐름의 평균속도는 감소하게 된다. 보행속도는 개인마다 차이가 있지만 일반적으로 보행공간의 밀도가 증가할수록 속도는 제한을 받는다(Fruin, 1971; Daamen, 2004). 특히 보행자 1인당 면적이  $2.5\text{m}^2/\text{인}$  이하로 줄어들게 되면 보행속도가 급격히 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Fruin, 1971).

### 3) 미시적 특성

보행행태는 개별특성에 따라 차이가 나며 심리적 요소, 환경적 요인 등 보행자에게 작용하는 내·외부적 요소로부터 복합적인 영향을 받아 다양한 형태로 나타난다(오성훈·이소민, 2013). 일반적으로 보행행태에 영향을 주는 보행자 개별특성으로는 연령, 성별, 문화, 인종, 통행목적, 소지품 유무 등이 있다(Daamen, 2004). 최근 유니버설 디자인(universal design) 등 장애의 유무나 연령 등에 관계없이 모든 사람들을 위한 보행공간 조성 및 정책 수립이 활성화되면서, 보행자 계층별 행태에 대한 관심이 증가하고 있다.

개별특성에 따른 보행속도와 관련된 초기 연구는 Fruin (1971)로 뉴욕과 펜실베이니아 역사를 대상으로 보행속도를 조사하였다. 조사결과, 남성의 보행속도는  $1.52\text{m/s}$ , 여성의 경우  $1.27\text{m/s}$ 로, 성별에 따라 보행속도는 차이가 나는 것으로 보고되었다. 또한 20~25세의 보행속도는  $1.37\text{m/s}$ , 81~87세는  $1.08\text{m/s}$ 로 조사되었으며, 65세 이후 고령자의 보행속도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

Fruin (1971) 이후 다양한 기존 연구 역시, 일반적으로 보행자의 나이가 많을수록 속도가 감소하는 것으로 관찰되었다. 65세 이상 고령 보행



자의 보행속도는 평균 보행속도보다 10m/분(0.17m/s) 정도 느리게 나타나고, 18~60세의 보행자와 60세 이상 보행자의 보행속도의 차이는 통계적으로 유의미한 것으로 조사되었다(Bowman and Vecellio, 1994; Knoblauch, et al. 1996). 또한 남성이 여성보다 보행속도가 빠른 것으로 알려지고 있다(Polus et al., 1983; Tarawneh, 2001). 또한 교통수단을 이용하거나 통근을 목적으로 하는 보행자들이 일반 시간제약이 없는 보행자에 비해 보행속도가 빠른 것으로 조사되었다(Finnis and Walton, 2008). 소지품 유무, 유아동반 여부 등에 따라 보행속도는 차이가 난다.

국내의 보행속도와 관련된 연구는 1982년 도로교통안전협회의 보행속도 조사로 16,681명을 대상으로 보행속도를 조사하였다. 조사결과 평균 보행속도는 1.26m/s 이며, 남자는 1.30m/s, 여자는 1.21m/s로 성별에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 연령대별 평균 보행속도는 연령이 높을수록 낮게 나타난다(<표 2-1> 참조).

<표 2-1> 성별, 연령별 평균 보행속도

(단위: m/s)

성별	남		여		평균
빠른 속도	1.69		1.56		1.63
느린 속도	0.97		0.93		0.95
평균 보행속도	1.30		1.21		1.26
인구비율	50.62%		49.38%		-
연령	20세 미만	20~40세	40~60세	60세 이상	평균
평균 보행속도	1.36	1.33	1.25	1.09	1.26
인구비율	25.60%	32.90%	27.80%	13.70%	-

자료: 도로교통안전협회(1982).

오성훈·이소민(2013)은 서울시 상업지역(신촌, 대학로, 종로, 가로수길 등)을 대상으로 보행자 유형별 보행속도를 조사하였다. 조사결과는 <표 2-2>와 같다. 총 15개 구간 각 50명의 보행자를 대상으로 보행속도를

조사한 결과, 서울시 상업지역 내 보행로의 보행속도 평균은 1.25m/s로 나타났다(최소 1.16m/s, 최대 1.38m/s). 남성이 여성보다 보행속도가 빠르며, 연령별 차이는 크지 않지만 21세~60세의 보행속도보다 60세 이상의 보행속도가 낮은 것으로 관찰되었다. 또한 혼자 이동하는 경우의 보행속도는 1.35m/s로 보행규모가 확대될수록 속도는 감소하고, 소지품 유무에 따른 보행속도 차이는 쇼핑백을 들고 가는 보행자의 속도가 1.09m/s로 가장 느린 것으로 조사되었다. 유모차를 동반한 보행자의 경우 유아를 보호하며 이동하므로 보행속도가 0.57m/s로 일반보행자의 절반 이하 수준으로 급감하는 특성을 보이는 것으로 분석되었다.

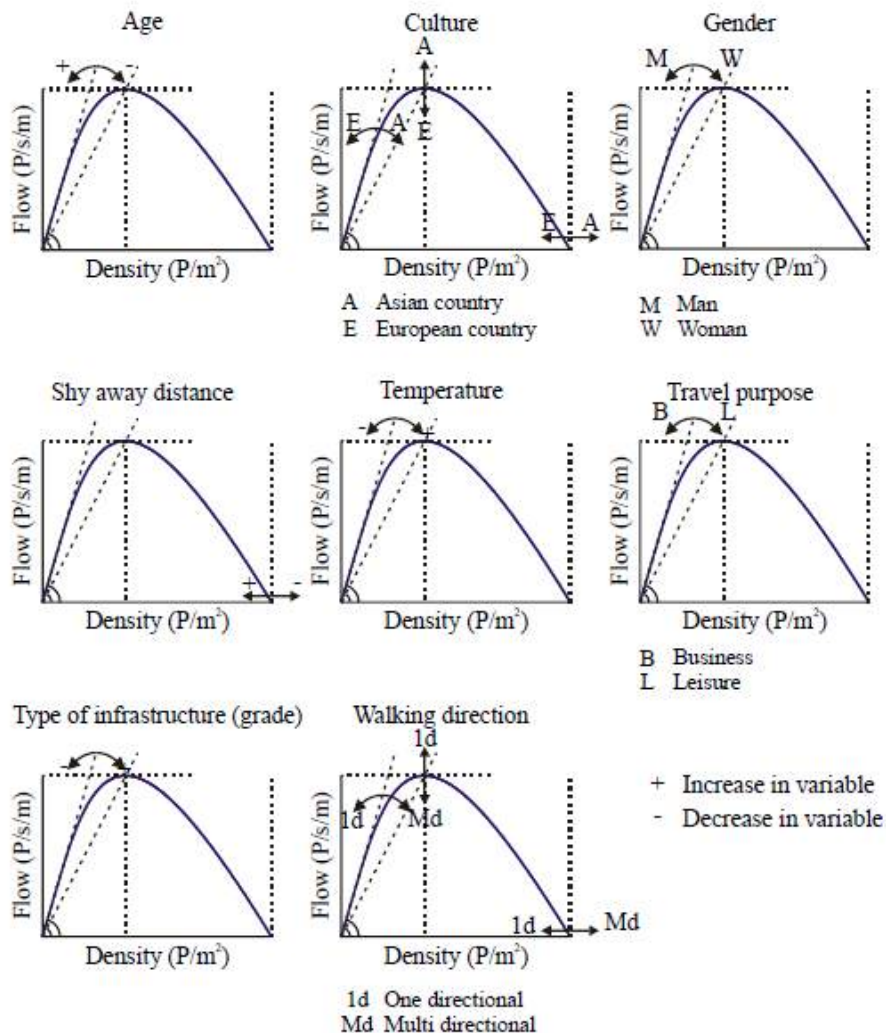
<표 2-2> 보행자 여건별 평균 보행속도

구분		평균 보행속도(m/s)
성별	남	1.27
	여	1.21
연령	20세 이하	1.20
	21~60세	1.25
	61세 이상	1.24
보행규모	1인	1.35
	2인	1.14
	3인 이상	1.09
목적	외부방문	1.15
	지역내 종사자	1.31
	기타	1.28
소지품*	1.09~1.33	
보행보조도구	전동휠체어	1.27
	유모차	0.57

주: \* 소지품 유무에 따른 보행속도는 휴대폰 1.25, 쇼핑백 1.09, 음료 1.24, 지갑 1.33, 옷 1.23, 담배 1.31, 서류 1.31, 기타 1.25m/s로 조사되었다.

자료: 오성훈·이소민(2013).

Daamen (2004)은 보행자의 개별특성과 보행속도 간 관계에 대한 기존 문헌을 검토하였는데, 일반적으로 연령이 높을수록, 여성보다는 남성이, 비업무보다는 업무 목적의 통행이 보행속도가 높은 것으로 조사되었다. 즉, 보행자 개별특성과 외부 환경 요인에 따라 보행류 모형은 차이가 나고 <그림 2-4>와 같이 표현된다(Daamen, 2004).



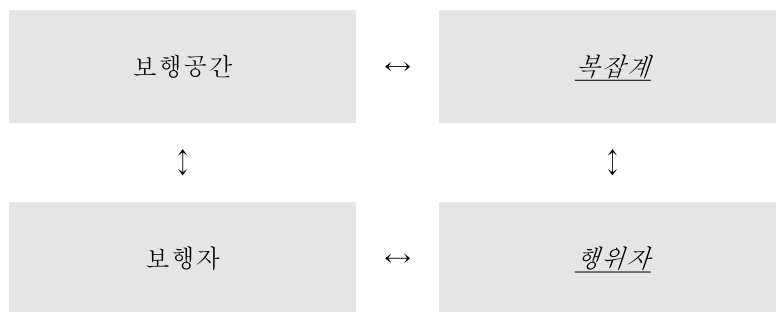
자료: Daamen(2004).

<그림 2-4> 개별특성에 따른 보행교통류 차이

## 제 2 절 지적 행위자

### 1. 지적 행위자의 개념

보행행태는 보행자의 개별특성, 주변 여건, 사회적·심리적 요인 등 복합적인 요소의 영향을 받기 때문에 이러한 행태 메커니즘을 정의하는 것은 어렵다. 이에, 최근에는 보행을 복잡계(complex system)<sup>3)</sup>의 한 요소로 보는 시각이 있다(이승재, 2013). 복잡계를 설명할 수 있는 가장 중요한 개념은 ‘창발 현상(emergence phenomena)’이다. 창발은 다양한 자연 및 사회현상에서 발견되는데 이를테면 사회에서의 집단행동(group dynamics), 뇌세포들이 만들어내는 기억이나 인지, 그리고 개별 행위자와 단위공간이 만들어내는 거대한 도시들은 창발의 예이다.

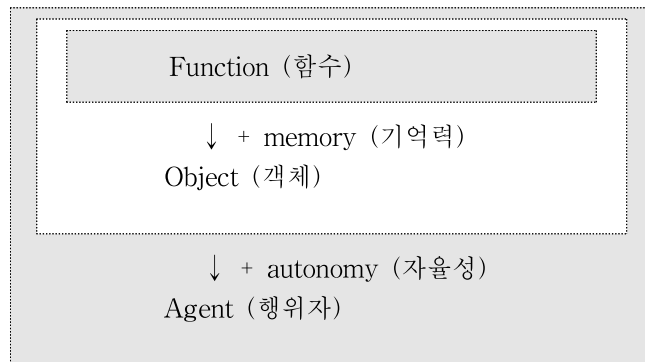


<그림 2-5> 보행과 복잡계

복잡계 해석 방법 중 하나인 행위자 기반 모형(agent based model)은

3) 수많은 구성요소들이 비선형 상호작용을 통해 얽혀 있어 거시적으로 보았을 때 창발현상이 나타나는 계를 의미하며 개별 행위자와 단위공간이 만들어내는 거대한 도시, 보행환경 등이 이에 해당한다(채승병 외, 2007; 이승재, 2013).

미시적 행위자의 특성에서 출발하여, 시뮬내기(simulation)를 통해 상향식(bottom-up)으로 거시적 현상의 동역학을 끌어내는 모형이다. 여기서 행위자는 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming)<sup>4)</sup>에서 이야기하는 객체(object)와 유사하며, 자기통제 및 자율적인 상호작용 능력이 부가된 것을 의미한다. 또한 학습능력과 적응능력을 갖춘 지적 행위자 개념으로 확장되기도 한다. 복잡계에서 관찰되는 행위자들은 몇 가지 특성을 가지고 있는데, 행위자는 이질적(heterogeneity)이며, 자율성을 가지고 있다. 또한 중앙에서 행동이 일괄적으로 통제되지 않고, 행위자가 가능한 선택 가운데 자신에게 가장 유리한 것을 선택하는 제한된 합리성(bounded rationality)을 기반으로 하여 의사결정을 수행하고 시스템 공간상의 주변 행위자와의 국소 상호작용(local interactions)을 한다. 행위자 기반 모형은 귀납적, 연역적 접근과 차별화되며, 생성적(generative) 접근 또는 구성적(constructive) 접근 방식으로 구성된다. 함수, 객체, 행위자 간 관계는 <그림 2-6>과 같으며, 행위자는 과거의 정보를 토대로 자율적으로 판단하는 능력을 갖는다(채승병 외, 2007).



자료: 채승병 외(2007).

<그림 2-6> 함수, 객체, 행위자 간 관계

- 4) 모든 데이터를 객체로 취급하여 프로그래밍 하는 방법으로, 처리 요구를 받은 객체가 자기 자신의 안에 있는 내용을 가지고 처리하는 방식이다. 객체지향 프로그래밍의 특성으로는 데이터의 자료추상화, 캡슐화, 정보은닉, 상속성, 동적결합 등이 있으며, 프로그래밍과 모델링에 강점을 가지고 있다.

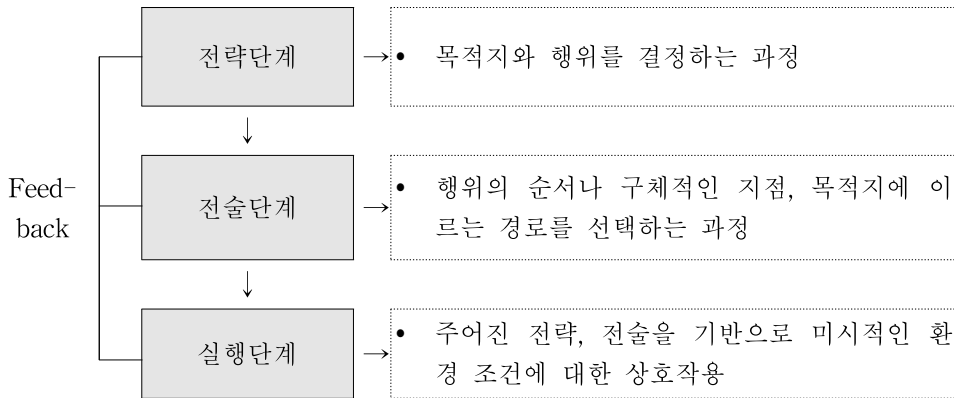
대체적으로 요구되는 행위자의 속성은 인식능력을 가질 것, 반응능력을 가질 것, 혼자 주어진 임무를 수행할 수 있을 것, 사회성이 있을 것, 변화하는 환경을 받아들이며, 적극적으로 대처를 할 수 있을 것, 지식습득능력이 있을 것 등으로 정의된다(이종호, 2003). 이와 유사하게, 문태현·성한욱(2006)에서 행위자 기반 모형의 특징은 특정 목적을 가진 사용자를 대신하여 작업을 수행하고, 각 행위자마다 고유의 속성과 지식을 가지고 있으며, 주변 정보를 취득하고 다른 행위자와 정보교환을 통해 의사결정을 수행하는 것이다. 또한 행위자는 환경의 변화를 인지하고 그에 대응하는 행동을 취하며, 학습기능을 가지며, 자신의 목적을 달성하기 위해 능동적인 자세를 가진다. 최근 복잡계에 대한 이해와 컴퓨터 기능의 향상으로, 복잡하고 임의적인 보행행태 구현을 위한 행위자 기반 모형이 활발하게 사용되고 있다(이종호, 2008; 이준, 2012).

## 2. 계층적 의사결정과정

Hoogendoorn et al. (2002)에 따르면 보행행태는 자극-반응과정이 아니며, 보행자의 자율성에 기반을 둔 의사결정과정이며, 계층적 구조를 가진다. 즉, 보행행태는 의사결정의 연속으로 볼 수 있으며, 보행자는 자신의 효용을 최대화 하는 의사결정을 수행한다. 계층적 의사결정과정은 <그림 2-7>과 같이 전략단계, 전술단계, 실행단계로 구분된다.

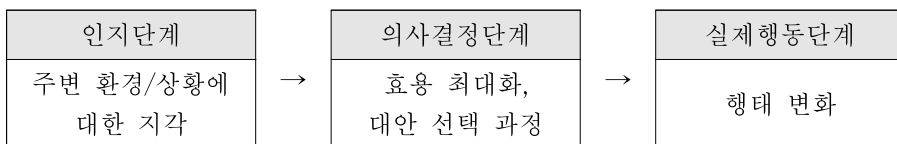
전략단계는 출발시간 또는 보행공간 내 목적지와 행위를 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정을 의미한다. 보행공간 내의 활동은 필수적인 것(mandatory)과 그렇지 않은 것(discretionary)으로 구분되기도 한다. 예를 들어 철도역사에서 표를 구입하기 위한 활동은 필수적 활동이며, 탑승 전 시간적 여유를 활용하여 신문을 구입하는 등의 행위는 필수적이지 않은 활동으로 분류될 수 있다. 전술단계는 활동스케줄링, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계이다. 경로선택의 경우 일반적으로 보행자는 목표지점에 이르는 최단거리를 선호하며, 같은 노력으로 최

대의 효과를 산출한다는 점에서 보행자는 효용을 최대로 하는 의사결정을 수행한다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 실행단계는 미시적 보행행태로, 장애물 회피 또는 다른 보행자와의 상호작용을 포함한 보행이동행태를 포함한다.



<그림 2-7> 계층적 의사결정구조

또한 의사결정과정을 통한 행태의 변화과정은 <그림 2-8>과 같이 인지단계, 의사결정단계, 실제행동단계로 구분되기도 한다. 보행행태도 이와 같은 단계로 분류될 수 있으며, 인지단계는 다양한 감각을 통해 주변 환경, 상황을 지각하는 과정을 의미한다. 이어, 개인의 효용을 최대로 하는 의사결정단계를 통해 실제 행태에 변화를 가져오는 실제행동단계를 수행한다(Helbing and Molnar, 1995).



<그림 2-8> 행태에 변화를 가져오는 과정

## 제 3 절 선행연구 고찰

### 1. 보행 연구 분류<sup>5)</sup>

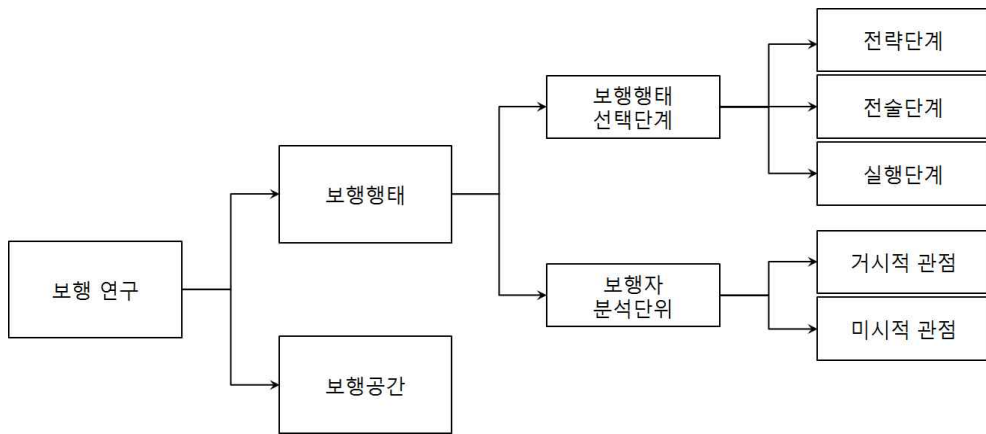
본 연구는 보행과 관련된 선행연구 중 보행자의 움직임 즉, 보행행태에 관한 연구와 보행공간 분석에 관한 연구를 검토한다. 첫째, 보행행태에 관한 연구는 보행자의 움직임에 초점을 맞추고 보행의 동적(dynamic)인 속성을 강조한다. 보행자의 움직임과 관련된 연구는 다시 보행행태 선택단계와 보행자 분석단위에 따라 세분된다. 앞서 살펴본 바와 같이 보행행태는 계층적 의사결정구조를 가지며 연속적인 선택행태를 가지고 있다(Hoogendoorn et al. 2002). 즉, 보행행태는 선택행태를 기준으로 전략단계, 전술단계, 실행단계로 구분되는데, 전략단계로는 보행자의 활동 선택 행태가, 전술단계는 활동스케줄링, 경로선택 행태가 대표적이다. 하위단계인 실행단계는 미시적 개념의 선택단계로 보행자의 이동행태 즉, 보행자와 다른 보행자 또는 장애물과의 상호작용을 반영한 보행이동행태 등이 포함된다. 이와 함께 보행자 분석단위에 의해 거시적 관점, 미시적 관점의 연구로 분류가능하다. 거시적 관점의 보행행태 연구는 보행자를 하나의 동질적이고 연속된 흐름(flow)으로 보며, 미시적 관점은 보행자를 독자적이고 독립적인 객체(individual object 또는 agent)로 보고 개별보행자 단위의 움직임과 상호작용에 주목한다.

둘째는 보행공간에 관한 연구로, 보행을 정적(static)인 개념으로 접근한다. 보행공간의 속성 분석과 함께, 속성과 보행량 간의 상관관계를 분석하여 공간의 사용패턴 등을 살펴본다. 공간의 속성을 정량적으로 분석하는 기법인 공간구문론(Space Syntax)을 활용한 연구가 대표적이며, 최근 인간의 가시접근성을 고려한 연구기법도 다수 활용되고 있다.

---

5) 한명주(2015)의 분류를 참조.





<그림 2-9> 보행 연구 분류

<표 2-3> 보행 연구 분류

구분			내용
보행행태 연구	보행행태 선택단계	전략단계	• 출발시간 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정을 의미
		전술단계	• 활동스케줄링 및 중간목적지 선택, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계
		실행단계	• 장애물 회피 또는 다른 보행자와의 상호작용 을 포함한 보행행태를 포함 • 보행이동행태, 시설물 이용행태 등이 해당
	보행자 분석단위	거시적 관점	• 보행자를 하나의 동질적이고 연속된 흐름으 로 접근 • 보행교통류 관계식을 기반으로 보행공간 서 비스수준을 분석
		미시적 관점	• 보행자를 독자적이고 독립적인 객체로 보고 보행자의 움직임과 상호작용에 주목
보행공간 연구			• 보행공간 속성 평가: 공간구문론, VGA 등을 이용하여 보행량-보행공간 상관관계 분석

## 2. 보행행태 연구

### 1) 보행행태 선택단계에 따른 분류

보행행태는 자극-반응과정이 아니며, 보행자의 자율성에 기반하며, 인적요인(human factors)등을 고려한 복잡한 의사결정과정이라는 접근과 함께, 보행자의 선택과정에 초점을 맞춘 연구가 진행되고 있다. 선택과정은 계층적 구조를 가지며 각각의 과정은 서로 상호연관성을 가지고 있다(Hoogendoorn et al., 2002). 본 연구에서는 이러한 선택단계로 선행연구를 분류하고 각 과정의 특성을 살펴보고자 한다.

#### ① 전략단계

전략단계는 목적지와 행위를 결정하고, 출발시간 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정단계를 의미한다. 전략단계의 행태는 보행 목적에 따라 다양하게 나타날 수 있으며, 보행공간 내 활동은 필수적 활동(예를 들면, 열차를 타기 전 표를 사는 활동 등이 이에 해당)과 그렇지 않은 활동으로 구분되기도 한다. 일반적으로 전략단계는 보행환경 외적인 요인에 의해 결정되는 경우가 많고 보행자의 활동선택과 관련된 자료는 많지 않은 편이다. 초기 연구는 Borgers and Timmermans (1986)로, 도심 상업지구를 대상으로 보행자의 목적지 선택 모형을 제안하였고, Timmermans et al. (1992)는 Borgers and Timmermans (1986)의 모형을 네덜란드에 적용하였다. 또한 Zhu and Timmermans (2005)은 쇼핑 등 비업무 통행에 대한 의사결정과정을 휴리스틱(heuristic) 접근 방식을 통해 살펴보았다. Boarnet and Crane (2001)은 출발 전 보행자가 보행수단을 선택하는 의사결정에 미치는 요인에 대하여 분석하였다. 일반적으로 실행단계의 보행행태모형에서는 전략단계에서 이루어지는 행태를 외생변수로 간주하는 경우가 대다수이다

(Dammen, 2004).

## ② 전술단계

전술단계는 활동스케줄링 및 중간목적지 선택, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계이다. 즉, 행위의 순서나 구체적인 지점, 목적지에 이르는 경로를 선택하는 행태가 포함되며, 보행행태 연구 중 가장 활발히 진행되고 있는 분야이다.

보행자의 경로선택과정은 다양하고 복합적 요인과 함께, 잠재적 요인이 영향을 미칠 수 있으나(Hill, 1982), 보행자의 경로선택에 가장 큰 영향요인은 ‘이동거리’이다(Seneviratne and Morrall, 1985; Borgers and Timmermans, 1986; Bovy and Stern, 1990; Verlander and Heydecker, 1997; 안은희 외, 2004; Li and Tsukagichi, 2005; Gim and Ko, 출간예정)

Bovy and Stern (1990)은 이스라엘 예루살렘을 대상으로 보행자의 경로선택 행태를 조사한 결과, 피실험자의 2/3가 이동거리가 가장 짧은 경로를 선택하는 것으로 나타났다. Seneviratne and Morrall (1985), Verlander and Heydecker (1997)등에서도 보행자는 가장 단순하거나 이동거리가 짧은 경로를 선택하는 것으로 분석되었다. Seneviratne and Morrall (1985)는 캐나다 켈거리시의 보행자를 대상으로 보행경로에 대한 설문을 수행한 결과, 응답자의 75%가 최단거리를 선택하는 것으로 조사되었다. 해당 경로를 선택한 이유에 대하여는 응답자의 50%가 가장 빠른 경로라고 느끼기 때문이라고 응답하였으며, 20%는 습관적으로 경로를 선택했다고 응답했으나, 그 경로를 처음으로 선택하게 된 이유는 최단경로라고 인지했기 때문이라고 응답했다.

경로선택과 관련하여 이동거리 외에 경로의 매력도, 횡단보도의 수, 보도의 혼잡상태, 기상상태, 보행공간의 환경(소음, 청결도 등), 안전성 등이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 주변 상점, 오픈 스페이스, 지형 등이 보행자의 경로선택 요소로 제시되기도 하였다. 이러한 경로선택

행태의 영향요인은 도시마다 다양하게 나타나는 것으로 분석되었는데, 뉴욕은 경로선택에서 상점의 연접길이(percentage of retail frontage)가 가장 큰 영향을 미친 반면, 홍콩은 이동거리가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Guo, 2009; Guo and Loo, 2013). 또한 최단거리가 항상 선호되는 것은 아니며, 방향전환 관점에서 가장 단순한 경로를 선택하는 행태도 보이는 것으로 분석되었다(Marchand, 1974).

경로선택과 관련한 국내연구로, 안은희 외(2004)는 직선의 최단경로, 방향전환이 적은 경로, 밝은 쪽을 선호하는 행동패턴, 대다수의 사람이 형성하는 흐름 등을 경로선택 차원에서 의사결정에 영향을 미치는 요인으로 선정하였다. 보행자의 경로선택은 익숙도와 조명의 영향력이 가장 크며, 거리, 횡단보도, 가로시설 등이 영향을 미치는 경우도 있다(이인성·김현옥, 1998). Gim and Ko (출간예정)은 보행경로 선택요인에 대한 기존 연구를 검토하고, 서울시 강남역 주변의 보행자를 대상으로 설문조사를 수행하여 경로선택에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 응답결과, 응답자의 80%가 최단경로를 선택하는 것으로 조사되었다. 여기서 설문응답자가 선택한 최단경로는 엄밀한 의미에서 인지된 최단경로(perceived shortest path)를 의미한다.

경로선택 행태에서 보행자는 목표지점에 이르는 최단거리를 선호한다는 점에서 개인의 효용을 최대화하는 경제학적 개념을 추구한다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서, Hoogendoorn and Bovy (2004)는 보행자는 자신의 효용을 최대화하는 선택을 하는 것으로 가정하고, 외생변수(주변 환경적 요인), 내생변수(보행자 개별특성), 교통조건(보행로 혼잡 등) 등을 고려하여 보행자의 경로 및 활동스케줄링 행태를 구현하였다.

경로선택의 영향요인으로 수직이동요소를 고려한 연구도 일부 있다. 수직이동의 경우 이동거리, 시간 뿐 아니라 경사도 등이 경로선택과정에 영향을 미칠 수 있다. Cheung and Lam (1998)은 홍콩 MTR 역사를 대상으로 계단과 에스컬레이터(E/S)의 경로선택에 대한 연구를 수행하였으며, 윤상원·배상훈(2007)은 수직이동시설의 통행비용에 영향을 미치는 요인으로 시설 이용시 피로도, 인적요인(쾌적함 및 대기시간을 고려한

선호도), 시설의 층별 소요시간 등의 주관적 지표를 고려하였다.

최근 보행경로의 다양성을 반영하고 보행자들의 실제 통행을 구현하기 위한 social path의 개념이 등장하기도 하였다. social path는 보행자들이 보다 효율적인 통행을 위해 보행로가 아닌 다양한 경로를 활용하여 이동하는 경로를 의미한다(최성택 외, 2015).

### ③ 실행단계

실행단계는 미시적 환경조건에서 다른 보행자 또는 장애물을 회피하는 보행이동행태로, 보행자와 주변 환경 요인간의 상호작용을 포함한다. 이는 계층적 의사결정구조 중 가장 하위단계에 해당하며 보행자의 의사결정이 반영된 기초적인 보행행태이다. 최근 컴퓨터 기술의 발달하고 시뮬레이션 기법이 개선됨에 따라 미시적 접근의 연구가 활발하게 진행되고 있다(Asano et al., 2009; Robin et al., 2009; Asano et al., 2010).

실행단계의 보행행태에서 가장 대표적인 모형은 Magnetic Force Model (Okazaki, 1979)과 Social Force Model (Helbing and Molnar, 1995)이다. 이는 실행단계 보행행태모형으로 가장 광범위하게 적용되고 있으나, 주변 환경과의 상호작용을 통한 결정적 행태 모형으로 보행자의 의사결정과정을 반영한다고 보기에는 어려움이 있다. 반면 Hoogendoorn (2001)은 Hoogendoorn and Bovy (2004)의 경로선택 행태 연구와 동일한 접근방식으로, 보행자의 효용을 최대화하는 실행단계 모형을 구축하였다. 여기서 발생하는 비효용은 보행경로에서 벗어남, 보행자의 불편함, 급격한 감·가속 등으로 정의된다. 이산선택모형, 게임이론 등 개인의 효용을 고려한 실행단계의 보행행태 연구도 최근 활발히 진행 중이다 (Antonini et al., 2006; Asano et al., 2009). 실행단계에서 의사결정은 전략, 전술단계의 행태에 영향을 받는다. Ishaque and Noland (2008)는 보행자의 도로횡단 행태에 관한 연구를 수행하였는데, 보행자는 전략단계인 목적지에 빨리 도착하기 위해, 전술단계인 횡단보도를 건너기 위해 실행단계에 해당하는 보행이동행태에서 보행속도를 높인다. 즉 전략, 전

술, 실행단계는 상호연관성을 가지고 있다.

또한 실행단계 보행행태의 영향범위를 산정하기 위해, Kitazawa and Fujiyama (2009)는 실험조사를 통해 보행자의 시야 및 시선 패턴을 살펴보고, 보행자가 다음 위치를 선택할 때 잠재적인 장애물을 고려하는 공간적 범위를 인간의 정보처리영역(information process space, IPS)이라 정의하고, 이를 조사하기 위해 머리부착형 시선 추적(eye tracker) 장치를 이용하여 IPS의 모양, 크기를 측정하였다. 시선 추적 결과 보행자는 장애물보다 잠재적인 위험성에 즉각적으로 대응하기 위해 보도표면에 더 시선을 고정하는 것으로 나타났으며, IPS의 형태는 부채꼴로 조사되었다. 또한 움직이는 장애물(다른 보행자 등)에 비해 고정 장애물에 시선을 향하는 것으로 관찰되었다.

## 2) 보행자 분석단위에 따른 분류

보행행태모형에서 보행자 분석단위에 따라 거시적 관점, 미시적 관점으로 분류된다.

### ① 거시적 관점

거시적 관점의 연구는 보행자의 움직임을 하나의 동질적이고 연속된 흐름으로 접근하며, 연구의 주요 목적은 보행자, 보행시설의 공간배치에 대한 것이다. 교통량(보행량)-밀도-속도 관계식을 기반으로 공간의 서비스수준(level of service, LOS)을 분석하는 연구가 대부분이며, Fruin (1971)을 시작으로 관련 연구가 활발히 진행되었다. 거시적 관점의 접근 방식은 모형의 단순성, 적용의 용이성 등의 이유로 널리 사용되고 있다.

Fruin (1971)은 뉴욕과 펜실베이니아 터미널에서 보행량 조사를 통해, 보행교통류(보행량, 속도, 밀도) 관계식을 도출하고 보행공간의 1인당 보행점유공간, 보행교통류율 등의 지표를 통해 공간의 서비스수준을 분석

하였다. 이는 거의 초기적 보행행태 연구이며, Fruin의 보행량-밀도-속도 관계는 이후 연구에서 다양하게 적용되어 왔다. 국내 도로용량편람(국토교통부, 2013)과 미국 도로용량편람(USHCM) 역시, 보행교통류 관계식에 기반하여 작성되었다. 도로용량편람의 보행자시설 분석은 보행밀도, 보행점유면적, 보행교통류율 등 정량적인 지표를 바탕으로 보행공간의 서비스수준을 산정하며, 보행공간은 보행자도로, 계단, 대기공간, 신호횡단보도로 구분된다. 보행교통류 거시적 특성을 통해 보행공간의 서비스수준을 도출하고자 하는 연구는 활발하게 진행되어 왔다(김건영 외, 2002; 김정현 외, 2002; Hughes, 2002; 임진경 외, 2004; Huang et al., 2009).

**<표 2-4> 보행자도로 서비스수준**

서비스수준	보행교통류율 (인/분/m)	점유공간 (m <sup>2</sup> /인)	밀도 (인/m <sup>2</sup> )	속도 (m/분)
A	≤20	≥3.3	≤0.3	≥75
B	≤32	≥2.0	≤0.5	≥72
C	≤46	≥1.4	≤0.7	≥69
D	≤70	≥0.9	≤1.1	≥62
E	≤106	≥0.38	≤2.6	≥40
F	-	<0.38	>2.6	<40

자료: 국토교통부(2013).

이신해(2012)는 도로용량편람의 방법론을 통해 서울시 전역을 대상으로 보도의 보행 서비스수준을 분석하였다. 도로용량편람의 서비스수준이 지나치게 양호한 결과가 나타나기 때문에, 해당 연구에서는 보다 현실적인 분석을 위해 보행량과 물리적 환경요소를 대표하는 유효보도폭의 절대값을 이용하여 보도의 서비스수준을 산정하였다. 최근 보행량, 속도, 밀도 등 정량적 요소 뿐 아니라, 보행공간의 쾌적성, 안전성, 편리성 등

정성적 요인을 반영한 보행공간 서비스수준 분석방법론 등이 제안되고 있다(김태호 외, 2009).

거시적 관점의 보행교통류 연구는 모형이 단순하고 적용이 편리하여 광범위하게 사용되고 있으나, 특정현상을 반영하기 힘들다는 단점이 존재하며, 각종 보행시설의 설치 여부 등 미세한 분석이 요구되는 경우 그 한계를 드러낸다. 보행량 또는 속도-밀도 관계식 등을 통해 보행공간을 평가한 연구는 보행자 간, 보행자와 보행시설, 건물 등 각종 보행에 영향을 미치는 요소들 간의 상호작용을 반영하지 못하며 보행량을 기준으로 보행공간을 평가하기 때문에 여러 가지 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)의 효율성을 측정하기 어렵다. 즉 보행에 영향을 미치는 요소의 변화가 보행공간의 서비스수준으로 완전히 설명되지 않는 문제가 존재한다. 또한 보행교통류는 차량과 달리 여러 방향의 움직임이 존재하기 때문에, 이를 하나의 관계식으로 표현하기에는 한계가 있다(Lam et al., 1995; Daamen and Hoogendoorn, 2003).

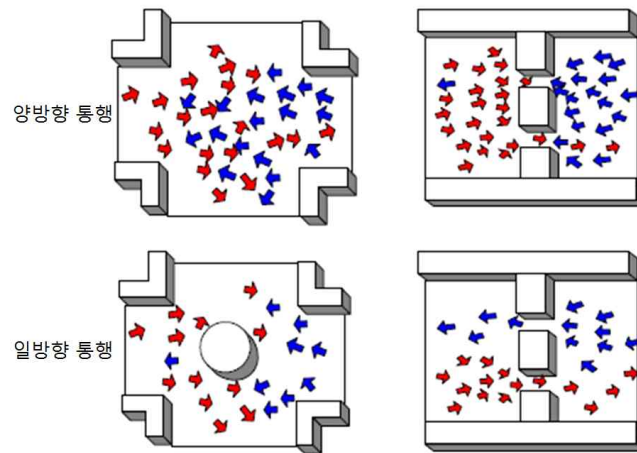
## ② 미시적 관점

거시적 관점 연구의 한계를 보완하기 위해 미시적인 관점에서의 보행행태 연구가 활발히 진행되고 있다. 미시적 관점의 연구는 개별보행자 단위의 보행행태 연구를 의미한다. 즉, 보행자를 독립적인 객체로 보며, 이러한 모형의 가장 중요한 특성은 보행자 간의 상호작용을 반영한다는 점이다(Helbing and Molnar, 1995; Werner and Helbing, 2003; Seyfried et al., 2006). 보행자를 기체(gas), 유체(fluid) 등 입자에 비유한 연구가 미시적 관점의 보행행태 초기 연구이다(Henderson, 1974; Helbing, 1992).

Helbing and Molnar (1998)은 동일한 크기의 보행공간에서 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)의 차이에 따라 실질적인 서비스수준은 차이가 나는데 거시적 관점의 연구에서는 이를 반영하지 못하는 단점을 제시하고 미시적 모형 즉, 개별행태 모형의 중요성을 강조하고 있다(<그림



2-10> 참조).



자료: Teknomo(2006).

<그림 2-10> 보행공간 운영기법(일방향 통행, 양방향 통행)

미시적 관점의 보행행태 연구는 보행공간의 속성(spatial representation)에 따라 이산형(discrete) 보행공간과 연속형(continuous) 보행공간으로 구분 가능하다. 이산형 보행공간은 분석대상공간을 셀(cell) 등의 이산적인 공간으로 표현하여 분석하는 것을 의미하며, 이러한 모형의 대부분은 사건 기반 시뮬레이션(event based simulation)기법을 이용한다. 대표적인 예는 CA(cellular automata)<sup>6)</sup>로, CA는 생물학 분야에서 개발되어 여러 분야에 적용되고 있으며, 일반적으로 인접한 격자형 셀 간의 상호작용을 규칙화한 모형을 뜻한다. 여기서, CA는 상태(state), 주변(neighborhood), 규칙(rule)의 3가지 구성요소를 갖는데, ‘상태’는 각 셀의 공간적 점유상태를 나타낸 값으로, CA모델에서는 이 값이

6) CA: 1940년 두 명의 수학자 Ulam와 Neumann이 고안해낸 이론으로, CA이론은 격자형으로 생긴 인접한 셀 간의 상호작용을 규칙화하여 프로그래밍한 셀들의 배열조합을 말하는 것으로 전체적으로도 셀 한 개와 같은 격자형 구조를 갖는다.

가장 간단한 숫자 0, 1로 표현된다. CA이론은 메모리 사용량이 적고 연산이 빨라 대규모 네트워크 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. ‘주변’은 서로에게 영향을 미치는 각 셀들의 집합수를 나타내는 것으로, 셀에 영향을 미치는 다른 셀들의 집합이라고 설명된다. ‘규칙’은 전체적 격자형 구조에서 각 셀들의 이동을 결정짓는 규칙을 말하는 것으로 셀의 이동방향과 거리가 규칙에 의해서 결정된다(이신해·이승재, 2009).

CA를 이용하여 보행행태를 구현한 초기 연구는 Gipps and Marksjo (1985)이며, CA는 보행자를 개별 단위로 고려하며 계산과정이 단순하여 보행행태모형에 널리 활용되고 있다(Galea and Galparsoro, 1994; Lovas, 1994; Blue and Adler, 1998; Batty and Jiang, 1999; Blue and Adler, 2001; Burstedde et al., 2001; Weifeng et al., 2003; Kirchner et al., 2004; Kitazawa and Batty, 2004).

Gipps and Marksjo (1985)는 분석대상지역을 셀로 구분하여 보행자가 한 사람씩 점유하도록 하고 주변 9개 셀에 대한 점수를 계산하여 가장 높은 편익이 생기는 셀로 이동하는 규칙을 생성하였다. 주변 보행자에 근접할수록 반발정도는 높아지고, 보행자가 목적지에 가까워질수록 편익이 커지는 규칙을 생성하여 보행자 움직임을 구현하였다. Blue and Adler (1998, 2001) 역시 보행자의 이동과정을 총 4단계(진로 결정, 결정된 진로로 이동, 통행속도 배정, 속도 갱신)로 구분하여 CA기반 양방향 보행자 행태를 모형화하였다. 국내에서도 CA 기반으로 보행자의 움직임을 구현한 연구는 다수 존재한다(손영태 외, 2004; 이신해·이승재, 2009; 곽수영 외, 2012). Antonini et al. (2006)는 보행자가 이동가능한 대안을 셀 단위가 아닌 속도, 방향에 따른 33개 이산적인 공간으로 표현하여 보행행태를 모사하였다. 속도는 유지, 감속, 가속 3가지로 구분되며, 각도는 시야를 기준으로 11개의 공간으로 구성된다. 33개 이산적 공간이 보행자의 다음 시간대(time step)의 이동이 이루어지는 대안으로 보고, 각 대안의 속성인 방향, 거리, 점유여부 등을 고려하여 로짓모형을 통해 대안 즉 보행공간을 선택한다.

CA 등과 같은 이산형 보행공간 모형은 적용 용이성 등의 장점으로 인

해 개별보행자 단위 보행행태모형으로 널리 이용되고 있으나, 차량과 달리 정해진 경로가 없고, 다양한 방향으로의 움직임(multi-direction movement)이 가능한 보행자의 특성을 세밀하게 반영하지 못한다는 단점이 존재한다. 이에 보행자의 움직임을 보다 현실적으로 반영하기 위하여 SLM(square lattice model), HLM(hexagonal lattice model), RHLM(rotated hexagonal lattice model) 등의 모형도 개발되었다(Muramatsu et al., 1999; Manniccam, 2002; 이준 외, 2009). SLM은 정사각형 셀 대신 정방격자를 활용하여 보행자 움직임을 표현하고자 하였고, 방향의 다양성을 고려하기 위하여 HLM을 통해 대각방향의 움직임을 구현하였다. RHLM는 HLM의 단점은 보완하고 보행자의 움직임을 보다 현실적으로 반영하기 위해 제안되었다(이준 외, 2009).

반면, 연속형 보행공간 모형은 이산형 보행공간 모형의 단점을 보완한 것으로, 연속적인 시·공간을 대상으로 한다. Okasaki (1979)의 Magnetic Force Model과 Helbing and Molnar (1995)의 Social Force Model이 대표적이다. Magnetic Force Model은 보행자와 목적지에 양극과 음극이 존재한다고 가정하고 자석간의 거리에 따른 자기력 관계를 통해 보행자의 움직임을 표현하였다. 보행자와 장애물은 각각 양극을 가지고 충돌을 피하며, 보행자와 목적지는 음극을 가져 목적지를 향해 진행하도록 되어 있다. Social Force Model은 Vissim 등 교통분야 상용패키지에 광범위하게 이용되고 있는 모형으로, 보행자의 인력(attractive force)과 척력(repulsive force)을 수학적으로 표현하였다. 즉, 목적지로 향하는 힘, 장애물 또는 다른 보행자 등에서 멀어지려는 힘 등 보행자에게 미치는 Social Force를 고려하여 보행자의 속도와 방향을 설정하게 된다. 이는 연속적인 모형으로 보행흐름분리(lane formation)<sup>7)</sup>, 자기조직화(self organization)<sup>8)</sup>등의 보행행태 현상을 반영한다. 그러나 Social Force

---

7) 보행공간에서 보행밀도가 어느 수준 이상이 되면 물리적인 경계나 통행방법 등 외부 규칙 없이도 서로 반대 방향끼리 피하고 같은 방향끼리 합쳐지면서 보행방향의 흐름이 자연스럽게 분리되는 현상, 즉, 같은 방향으로 보행하는 군집끼리 열을 이루는 현상을 의미한다.

8) 보행자 개인의 선택과 행동이 모여 일정한 패턴과 질서를 이루는 경향을 의

Model은 보행자의 복잡한 행동규칙, 다양성 등을 반영하기 어려우며, 또한 근시안적인(myopic) 기법으로 보행자의 시각적인 능력을 고려하고 있지 않다는 문제점이 제기되고 있다(Nasir et al., 2014).

이와 함께, 실측자료를 통해 보행자의 보행이동행태를 검증한 연구도 있다. Teknomo (2002, 2006)는 보행이동행태모형인 Microscopic Pedestrian Simulation Model(MPSM)을 개발하고 미시적 보행자 시뮬레이터 Micro-Pedsim를 통해 현장자료와의 검증을 수행하였다. 기존 Magnetic Force Model, Social Force Model 등은 실측자료를 통한 검증이 부족한 문제점이 존재하였는데, Teknomo (2002, 2006)는 이를 해결하고자 노력하였다.

### 3) 기타

최근 안전이 강조됨에 따라 화재, 재난 등 긴급상황의 보행행태에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Zheng et al., 2009). 긴급상황시 보행행태는 일반상황에서의 보행과 다른 양상을 보이는 것으로 알려져 있으나, 긴급상황에 대한 실질적 보행자 행태는 쉽게 실험이 어렵고 자료도 충분하지 않다(이준, 2013). 일반적으로 긴급상황시 보행행태는 행태에 영향을 미치는 심리적·본능적·사회적 요인에 대한 이해가 우선시 되어야 하며(Pan, 2006; 이준, 2013) 이러한 요인은 크게 공간의 익숙함, 의사결정유형, 출구 안내, 개인의 스트레스 한계정도, 군집 특성 등으로 구분가능하다(Pan, 2006).

국내에서 긴급상황 시 보행행태와 관련된 연구는 초기 단계로, 이준(2013)은 인간의 보행을 ‘본능적 보행(instinctual walking)’과 ‘지적 보행(intellectual walking)’으로 구분하고 평상시의 보행행태와 패닉상태의 피난행태를 구분하였다. 또한 총 대피시간을 최소화하는 대피모형 개발, 최적 피난 해석 시뮬레이션 중 하나인 EXODUS를 이용하여 실내보행공간

---

미한다. 병목구간이나 출입구에서 빠져나가지 못한 보행자들이 아치형의 군집(archformation)을 형성하는 행태가 대표적이다.

의 경로선택 행태 등의 연구가 있다(윤성환 외, 2009; 곽수영 외, 2012). 긴급상황 시 보행행태 연구는 일반 보행공간 외 선박 등 다양한 공간에서도 적용되고 있다(하술 외; 2013).

#### 4) 보행행태 연구의 요약

보행행태와 관련된 연구는 보행자 분석단위와 보행행태 선택과정에 따라 분류된다. <표 2-5>에서는 보행연구 분류에 따른 선행연구를 정리하였다. 본 연구는 개별보행자 단위의 보행이동행태를 모형화하는데 목적이 있으므로 보행자 분석단위 중 미시적 관점과 보행행태 선택과정 중 실행단계에 해당한다.

<표 2-5> 보행자 움직임 관련 선행연구 분류

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점		전략	전술	실행
			공간 <sup>1)</sup>			
Antonini et al. (2006)		○	D			○
Asano et al. (2009)						○*
Asano et al. (2010)					○*	○*
Batty and Jiang (1999)		○	D			○
Blue and Adler (1998)		○	D			○
Blue and Adler (2001)		○	D			○
Boarnet and Crane (2001)				○		
Borgers and Timmermans (1986)				○*	○	
Bovy and Stern (1990)					○	
Burstedde et al. (2001)		○				○
Cheung and Lam (1998)					○*	
Fruin (1971)	○					
Galea and Galparsoro (1994)		○	D			○
Gim and Ko (출간예정)					○	

<표 2-5> 계속

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점	공간 <sup>1)</sup>	전략	전술	실행
Gipps and Marksjo (1985)		○	D			○
Guo (2009)					○	
Guo and Loo (2013)					○	
Helbing (1992)		○	C			○
Helbing and Molnar (1995)		○	C			○
Helbing and Molnar (1998)		○	C			○
Henderson (1974)		○				○
Hill (1982)					○	
Hoogendoorn (2001)		○				○*
Hoogendoorn and Bovy (2004)		○			○*	
Huang et al. (2009)	○					
Hughes (2002)	○					
Ishaque and Noland (2008)		○				○*
Kirchner et al. (2004)		○				○
Kitazawa and Fujiyama (2009)						○
Kitazawa and Batty (2004)		○	D		○	○
Li and Tsukagichi (2005)					○	
Lovas (1994)		○	D			○
Manniccam (2002)		○	D			○
Marchand (1974)					○	
Muramatsu et al. (1999)		○	D			○
Nasir et al. (2014)		○	C			○
Okasaki (1979)		○	C			○
Robin et al. (2009)						○*
Seneviratne and Morrall (1985)					○	
Teknomo (2002)		○	C			○
Teknomo (2006)		○	C			○
Timmermans et al. (1992)				○*		
Verlander and Heydecker (1997)					○	
Weifeng et al. (2003)		○	D			○

<표 2-5> 계속

선행연구	분석단위			보행행태 선택과정 <sup>2)</sup>		
	거시적 관점	미시적 관점		전략	전술	실행
		공간 <sup>1)</sup>				
Zhu and Timmermans (2005)				○*		
곽수영 외 (2012)		○	D			○
국토교통부 (2013)	○					
김건영 외 (2002)	○					
김정현 외 (2002)	○					
김태호 외 (2009)	○					
손영태 외 (2004)		○	D			○
안은희 외 (2004)					○	
윤상원·배상훈 (2007)					○	
윤성환 외 (2009)					○	
이신해 (2012)	○					
이신해·이승재 (2009)		○	D			○
이인성·김현옥 (1998)					○	
이준 외 (2009)		○	D			○
임진경 외 (2004)	○					
하슬 외 (2013)		○	C			○

주: 1) 미시적 관점의 보행행태 연구 중 보행공간 속성이 이산적인 경우 D(discrete), 연속적인 경우 C(continuous)로 표시하였다.

2) \*는 보행자의 의사결정과정을 구체적으로 제시한 연구를 나타낸다.

## 5) 실행단계 보행행태모형

### ① Social Force Model

Helbing and Molnar (1995)은 우연하고 무질서하게만 보이는 보행자들의 움직임에서 나름의 일관성, 합리성, 보편성을 발견하고 Social Force Model을 개발하였다. Social Force Model에서 Social Force는 보행자와 주변의 다른 보행자, 또는 물리적, 환경적 요인들 사이에서 나타나는 상호작용을 의미한다. 방향과 속력을 유지하려는 힘과 다른 보행자나 물체로부터 멀어지거나 더 가까이 다가가려는 힘이 동시에 작용하며, 이러한 Social Force가 보행자의 속도를 결정한다. Social Force는 크게 목적지로 향하는 힘(driving force)과 장애물 또는 다른 보행자로부터 적정거리를 유지하려고 하는 척력, 반대로 가족, 친구 등 동반자, 상점 등의 매력요인으로 인한 인력의 합으로 구성된다.

먼저, 목적지로 향하는 힘은 [식 2-2]와 같이 표현된다.

$$\vec{f}_\alpha^o = \frac{1}{\tau_\alpha}(v_\alpha^o \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad [\text{식 2-2}]$$

여기서,  $\vec{f}_\alpha^o$ 는 보행자  $\alpha$ 의 목적지로 향하는 힘,  $\tau_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 반응시간,  $v_\alpha^o$ 는 보행자  $\alpha$ 의 희망속력(스칼라),  $\vec{e}_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 희망방향,  $\vec{v}_\alpha$ 는 보행자  $\alpha$ 의 현재속도를 의미한다.

멀어지고자 하는 반발력인 척력은 [식 2-3]과 같다.

$$\vec{f}_{\alpha\beta} = A_\alpha \exp\left[\frac{r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}}{B_\alpha}\right] \vec{n}_{\alpha\beta} \cdot F_{\alpha\beta} \quad [\text{식 2-3}]$$

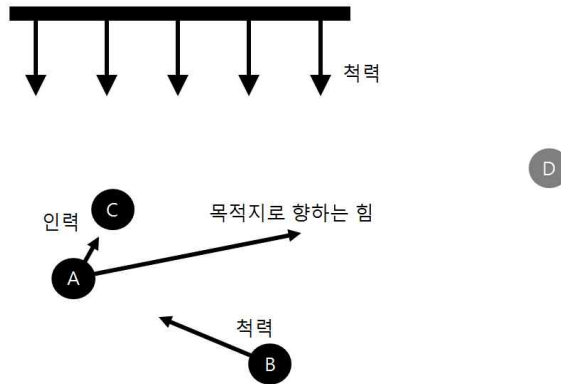


여기서,  $\vec{f}_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 가 다른 보행자  $\beta$ 로부터 받는 힘,  $A_\alpha$ 와  $B_\alpha$ 는 파라미터를 나타낸다. 또한  $r_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 의 신체타원 반지름의 합,  $d_{\alpha\beta}$ 는 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 의 중심점간 거리,  $\vec{n}_{\alpha\beta}$ 는 다른 보행자  $\beta$ 로부터 보행자  $\alpha$  방향의 표준 벡터,  $F_{\alpha\beta}$ 는 보행자의 이방성<sup>9)</sup>을 고려한 변수(0~1사이의 값)이다.

동반자 등 매력요인으로 다가가고자 하는 인력은 [식 2-4]이다.

$$\vec{f}_{\alpha\beta}^{ATT} = -C_{\alpha\beta} \vec{n}_{\alpha\beta} \quad [\text{식 2-4}]$$

여기서,  $C_{\alpha\beta}$ 는 파라미터,  $\vec{n}_{\alpha\beta}$ 는 타 보행자  $\beta$ 로부터 보행자  $\alpha$  방향의 표준 벡터를 의미한다.



주: A는 보행자, B는 다른 보행자, C는 동반자, D는 목적지를 나타낸다.

<그림 2-11> Social Force Model에서 Social Force의 상호작용

9) 이방성(anisotropy)은 물체의 물리적 성질이 방향에 따라 다른 것을 의미한다.

목적지로 향하는 힘, 인력, 척력의 합으로 구성되는 Social Force ( $\vec{f}_\alpha$ : 보행자  $\alpha$ 의 Social Force)는 [식 2-5]와 같이 표현된다.

$$\vec{f}_\alpha = \vec{f}_\alpha^o + \sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta} + \sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta}^{ATT} \quad [\text{식 2-5}]$$

## ② Magnetic Force Model

Okazaki와 Matsushita는 자기력을 이용한 Magnetic Force Model을 개발하였다(Okazaki, 1979; Okazaki and Matsushita, 1981; Matsushita and Okazaki, 1991; Okazaki and Matsushita, 1993). Magnetic Force Model은 보행자와 주변시설을 자기장 내의 자성체로 적용한 모형으로, 보행자, 장애물 및 다른 보행자를 양극으로 보고 도착지를 음극으로 여겨서 이에 따라 발생하는 인력과 척력으로 보행자의 이동을 구현하였다. 자기력은 [식 2-6]과 같이 정의된다.

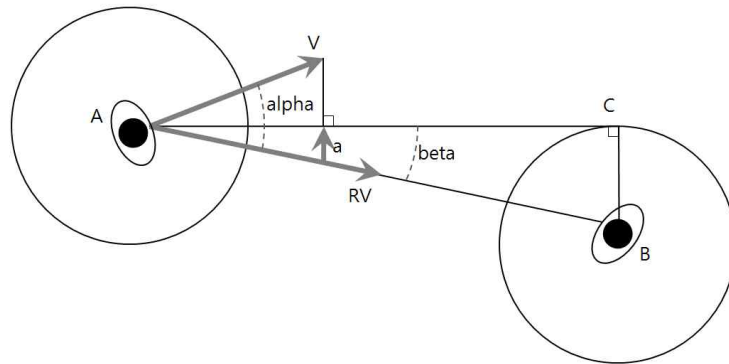
$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{s^3} \cdot \vec{s} \quad [\text{식 2-6}]$$

여기서,  $\vec{F}$ 는 보행자에게 작용하는 자기력,  $k$ 는 파라미터를 나타낸다. 또한  $Q_1$ 는 기준보행자의 자극강도(intensity of magnetic pole),  $Q_2$ 는 기준보행자 외 자성체의 자극강도,  $\vec{s}$ 는 기준보행자에서 자성체로 향하는 벡터,  $s$ 는 기준보행자와 자성체간 거리이다.

또한 보행자가 다른 보행자 또는 장애물과의 충돌을 피하기 위한 감속도  $a$ 는 [식 2-7]과 같다.

$$a = \tan \beta \cdot \cos \alpha \cdot v_A \quad [\text{식 2-7}]$$

여기서,  $\alpha$ 는 상대속도(RV, 보행자 A에 대한 B의 상대속도)와 보행자 A의 속도간 각도,  $\beta$ 는 상대속도(RV, 보행자 A에 대한 B의 상대속도)와 A보행자와 B보행자 영역의 접선(AC)간 각도,  $v_A$ 는 보행자 A의 속도이다(<그림 2-12> 참조).



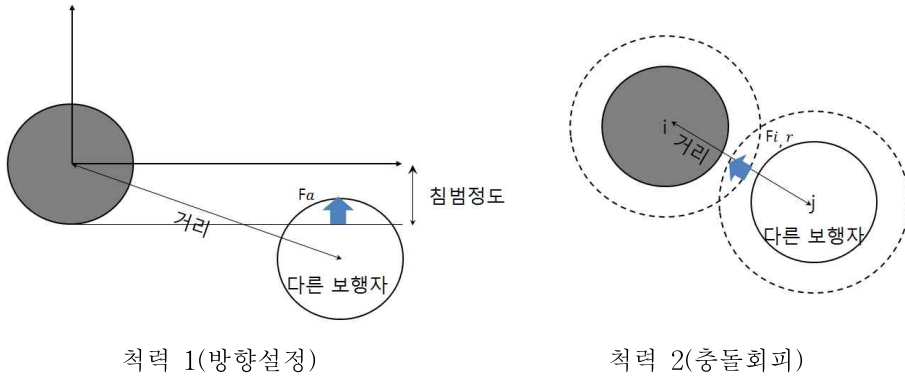
자료: Okazaki and Matsushita(1993).

<그림 2-12> Magnetic Force Model의 감·가속도

### ③ Microscopic Pedestrian Simulation Model

Teknomo (2002, 2006)는 Microscopic Pedestrian Simulation Model (MSPM)을 개발하였다. MSPM은 Magnetic Force Model, Social Force Model 등 기존 모형들이 검증이 부족하다는 단점을 극복하고자 노력하였으며, 실제 횡단보도에서 수집된 보행자 자료를 모형의 결과와 비교하였다. 즉, MSPM의 가장 큰 장점은 실제 자료를 기반으로 모형을 개발하였다는 점이라 볼 수 있다. MSPM에서 보행자는 원으로 표현되며, 각각의 보행자는 기중점을 가지고 있다. 보행자는 2가지 종류의 힘으로부터 영향을 받는데, 앞으로 나아가고자 하는 힘(forward force)과 주변 보행자로부터 멀어지고자 하는 힘인 척력이다. Teknomo (2002, 2006)는

횡단보도 내 보행자들의 움직임을 조사하여 시간대별로 보행자의 속도와 밀도 등을 분석하였으며, 시뮬레이션 결과 값과의 비교를 통해 프로그램의 신뢰성을 설명하였다.



자료: Teknomo(2002).

### <그림 2-13> MSPM의 척력

앞으로 나아가고자 하는 힘은 다른 보행자의 방해가 없을 경우, 즉 다른 보행자와의 상호작용이 발생하지 않을 때, 보행자가 현재 위치에서 목표 위치로 향하는 힘  $g(t)$ 과 속도  $\hat{v}_f(t)$ 를 의미한다. 여기서  $\hat{v}_f(t)$ 는 0과 보행자의 최대속도( $\mu_{\max}$ ) 사이의 값이다. 목적지로 가고자하는 힘  $g(t)$ 과 속도  $\hat{v}_f(t)$ 는 [식 2-8], [식 2-9]로 표현된다.

$$g(t) = \frac{e(t) - p(t)}{\|e(t) - p(t)\|} \quad [\text{식 2-8}]$$

$$\hat{v}_f(t) = \frac{\mu_{\max}}{\alpha} \frac{(e(t) - p(t))}{\|e(t) - p(t)\|} \quad [\text{식 2-9}]$$

여기서,  $\alpha$ 는 파라미터,  $e(t)$ 는 목적지 위치,  $p(t)$ 는 현재 위치이다.

또한 보행자의 진행방향에 다른 보행자가 존재하면 멀어지고자 하는 척력이 발생한다. MSPM에서는 두 가지 척력을 고려하고 있다. 첫째는 방향설정과 관련되며, 보행자의 진행방향에 다른 보행자가 위치할 경우 가장 가까운 다른 보행자를 대상으로 산정되는 척력으로, 척력을 고려한 속도  $\hat{v}_a^i(t)$ 는 [식 2-10]과 같이 표현된다. 두 번째는 보행자 주변의 모든 보행자를 대상으로 계산되며 충돌을 회피하기 위한 척력을 의미한다. 이를 고려한 속도  $\hat{v}_{i,r}(t)$ 는 [식 2-11]이다.

$$\hat{v}_a^i(t) = \frac{\mu_{\max}}{\chi} \frac{(2r - y(t))}{\|p_k(t) - p_i(t)\|} \quad [\text{식 2-10}]$$

$$\hat{v}_{i,r}(t) = \frac{\mu_{\max}}{\beta} \sum_j \frac{(2r - d_{ij}(t))(p_i(t) - p_j(t))}{d_{ij}(t)} \quad [\text{식 2-11}]$$

여기서,  $\beta$ 와  $\chi$ 는 파라미터,  $p_k(t)$ 는  $k$  보행자의 현재 위치,  $p_i(t)$ 는  $i$  보행자의 현재 위치,  $\|p_k(t) - p_i(t)\|$ 는 보행자  $i, k$  간 거리,  $r$ 는 보행자의 신체타원 반지름,  $y$ 는 다른 보행자의 침범 정도이다.

### 3. 보행공간 연구

보행공간을 분석하는 기법 중 가장 대표적으로 활용되는 것은 공간구문론(space syntax)<sup>10)</sup>이다. 공간구문론은 분석대상을 네트워크로 구현하여 공간적 특성을 분석하며, 건물, 오픈스페이스, 가로망 등의 위계와 특

---

10) 공간구문론은 영국 런던 대학(University College London)의 Hillier 교수와 Hanson 교수가 개발한 공간분석 이론으로 건축물 및 도시의 공간구조 분석을 객관적으로 해석하는 틀을 제공한다.

성을 분석하는데 주로 활용된다. 각 공간의 접근성을 산출함에 있어 전체 공간구조에서 특정 공간의 위계를 기반으로 하며, 공간깊이(depth)<sup>11)</sup>가 가장 기본적인 개념이다. 또한 공간분석을 위해 연결도와 통합도 개념에 대한 이해가 필요한데, 연결도(connectivity)는 한 축선에서 연결되는 모든 축선을 의미하며, 통합도(integration)는 특정 한 노드에서 다른 노드로 가기 위한 축선의 개수를 의미하는 공간깊이를 이용하여 산정한다. 즉, 통합도는 링크의 접근성을 나타내는 척도로, 전체통합도(global integration), 국부통합도(local integration) 등 지표<sup>12)</sup>를 통해 공간구조의 속성을 정량화한다(김영옥, 2003).

공간구문론을 활용하여 보행공간의 속성을 분석하고 보행량과의 상관관계를 추정하여 보행공간 특성 및 공간사용패턴 등을 정의할 수 있다. 일반적으로 보행공간의 접근성을 기반으로 보행공간의 통합도를 측정하고, 보행공간의 통합도와 보행량은 양의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 또한 토지이용특성에 따라 보행량과 공간과의 관계는 다양하게 나타나고 있다(김영옥, 2003; 김영옥·신행우, 2004; 김영옥·신행우, 2007; 김기현 외, 2014). 보행의 경우, 차량과 달리 공간구조의 전체통합도 보다 국부통합도에 밀접한 관련성이 존재하는 것으로 분석되었다(김영옥, 2003).<sup>13)</sup> 또한 가시접근성 등 인간의 시지각적 특성을 반영하여 보행공간의 구조를 살펴본 연구도 있다(정혜선·김영옥, 2012). 교통부문에서 공간구문론을 활용한 연구는 김찬주·김영옥(2007)로, 지하철 역사내 공간구조를 VGA(visibility graph analysis)<sup>14)</sup>를 이용하여 분석하고 공간특성과 보행량을 비교·분석하여 지하철 역사의 공간계획과 사용패턴의 관계를 살펴보았다. 분석결과, 지하철 역사내에서 승강장이 가장 낮은 통합도

11) 공간형태 개념에서의 거리를 의미하며 물리적 거리의 개념과 다르다.

12) 전체통합도는 분석대상 범위내의 축선도에 표현된 모든 공간을 기·종점으로 가정하였을 때, 계산한 통합도이며, 국부통합도는 공간구조 속성을 인접한 공간 범위내만 고려하여 산출한다.

13) 차량은 보행에 비하여 통행거리가 길고 광역적 행태를 보이므로, 전체통합도와 더 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다.

14) VGA는 공간구문론 기법 중 특히 가시접근성을 기본으로 공간을 정량화하는 기법을 의미한다.

를 가지는 것으로 나타났으며, 역사 설계시 타 공간에 비하여 승강장 부분에 대한 가시접근성을 확보해야 하는 개선사항을 도출할 수 있다. 또한 기존 공간구문론 방법을 이용하여 보행량을 예측할 경우 교통 부문의 네트워크 구성방법과 상이하여 활용에 어려움이 있기 때문에, Dial 알고리즘을 활용하여 링크의 상대적 중요도를 나타내는 연결도 개념을 도입하고 보행량을 예측하였다(한상진 외, 2008). 공간구문론은 보행공간 구조를 정량화하고 분석이 가능한 장점을 가지고 있으므로, 이를 통한 공간의 통합도는 경로선택행태와 밀접한 연관이 있을 수 있다.

#### 4. 선행연구의 시사점

지속가능한 녹색교통 중심체계, 비동력 교통수단으로 패러다임이 변화함에 따라 보행에 대한 재조명이 요구되고 있다. 보행활성화와 보행환경 개선을 위한 정책방안, 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 본 연구는 보행공간 계획 및 운영 방안의 평가를 위한 보행공간 평가 틀의 핵심이 되는 보행행태모형 개발을 목적으로 한다. 따라서 보행행태에 초점을 맞추어 관련 선행연구를 검토하였다.

보행행태 연구는 거시적 관점의 보행교통류 접근방식에서 시작되어 최근에는 개별보행자 단위의 미시적 연구가 활성화되고 있다. 거시적 관점의 연구는 단순한 모형구조와 적용 편리성으로 널리 활용되었으나, 보행자의 상호작용을 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 이에 개별보행자 단위의 미시적 관점 연구가 주목받고 있다. 미시적 관점의 연구 중 보행공간을 이산적(셀 등)으로 보는 연구는 보행자의 다방향 움직임 행태를 세밀하게 반영하지 못하는 단점이 존재한다. 또한 Social Force Model 등 개별행태를 고려하는 대부분의 연구는 주변 요소들의 상호관계(목적지로 향하는 힘, 장애물을 회피하는 힘 등)만을 집중하고 있어, 보행행태가 인간의 의사결정과정이라는 사실을 간과하고 있는 경우가 많다. 즉 이러한 모형은 보행자의 의사결정과정이 반영되지 않고, 확률적 행태가 고려되지 않은 결정적 모형이라는 한계를 가지고 있다.

최근 보행자의 자율성을 강조한 모형이 주목받고 있다. 복잡계를 구현하기 위한 행위자 기반 모형에서 지적 행위자는 객체에 자기 통제 및 자율적 상호능력을 갖춘 것을 의미하며, 의사결정을 수행할 수 있다. 보행행태 의사결정과정은 다양한 인적요인이 반영된 복합적 과정으로 이를 수학적 모형으로 구축하는 것은 쉽지 않다. 또한 보행자의 개별특성에 따라 다양하고 주관성, 애매함 등 불확실성 요소가 포함되고 보행공간의 속성, 주변 여건, 사회적·심리적 요소 등이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 행태 매커니즘을 정의하는 것은 매우 어렵다.

이러한 어려움에도 불구하고 보행환경 개선, 보행공간 평가를 위해서는 실제 현상을 보다 정확히 반영한 보행행태모형이 구축되어야 하며, 보행자의 복잡한 의사결정과정을 반영하여야 할 것이다. 의사결정과정의 불확실성, 주관성을 정량화하기 위한 방안이 필요하며, 이와 더불어 개발된 모형의 검증 및 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

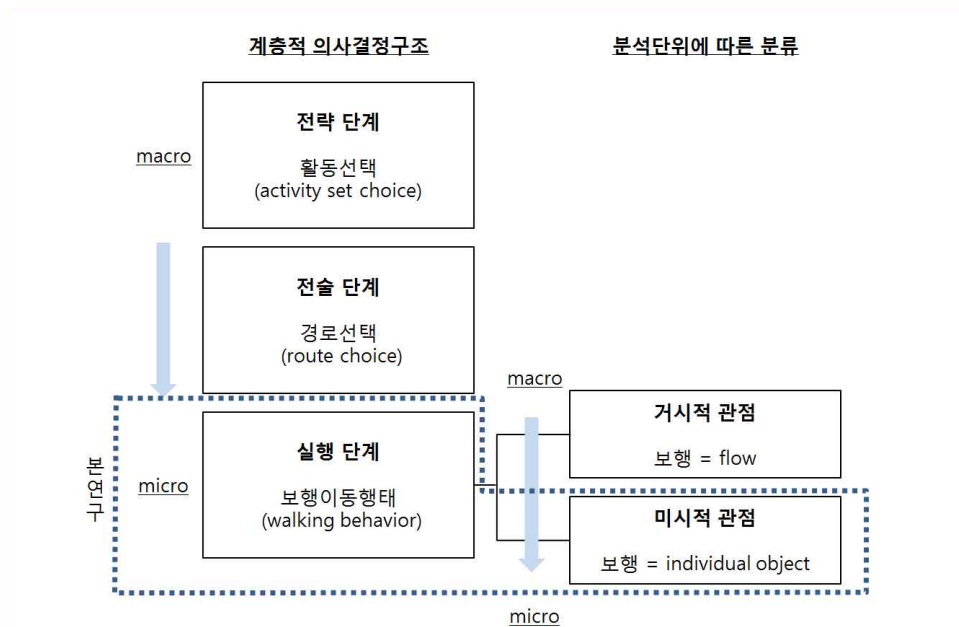
이에 본 연구에서는 보행자 간 상호작용을 고려하고 의사결정과정을 수행하는 개별보행자 단위의 미시적 보행이동행태모형을 구축하고자 한다. 여기서 ‘미시적’은 첫째, 개별보행자 분석단위의 모형이라는 점과 둘째, 보행행태의 전략, 전술, 실행단계 중 하위 개념인 실행단계의 모형이라는 것을 의미한다. 보행자는 보행행태의 기초이자 핵심인 보행이동행태모형을 통해 공간 내에서 움직이고 다양한 활동을 수행하므로 보행이동행태는 매우 정교하고 현실을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 여기서 보행자는 자율성을 가지며 주도적으로 행위를 하는 객체로, 개인의 판단기준에 따라 의사결정을 수행한다. 복잡한 의사결정과정을 정량화하는데 장점을 가지고 있는 퍼지추론을 적용하여 보다 인간의 사고에 근접한 모형을 만들고자 한다. 또한 보다 현실적인 모형을 구축하기 위하여 다양한 자료를 수집하고 모형에 적용하고자 한다. 보행이동행태모형은 보행행태의 가장 하위 개념으로 보행자 시뮬레이터에서 구현되어, 핵심 기능을 수행하도록 개발한다. 또한 보행자 시뮬레이터의 타 모듈과 연계되어 다양한 효과척도(Measure Of Effectiveness, MOE) 산출을 통해 보행공간의 계획 및 운영 평가 등에 활용이 가능할 것으로 판단된다.



## 제 3 장 보행이동행태모형 개발

### 제 1 절 보행이동행태 정의

모형개발에 앞서 보행이동행태를 정의하고자 한다. 본 연구에서 보행이동행태는 개인의 의사결정을 토대로 이루어지며, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 의미한다. 보행이동행태는 계층적 의사결정 구조 중 실행단계에 해당하며, 실행단계는 보행자와 미시적 환경조건과의 상호작용을 나타내는 단계로 보행행태모형의 기초가 되는 핵심 모형이다.

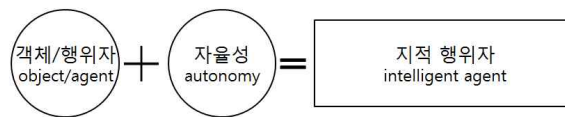


<그림 3-1> 보행이동행태의 위계

본 연구의 보행이동행태는 다음과 같은 5가지 특성을 가지고 있다.

첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현한다. 보행자를 하나의 객체로 보고 개별특성을 고려하여 보행이동행태모형을 구축한다.

둘째, 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 지적 행위자는 자기통제, 자율적 상호작용 능력을 가진 객체를 의미한다. 즉, 본 연구의 보행자는 자율성을 갖고 있으며 개인의 판단기준에 따라 의사결정을 수행한다.

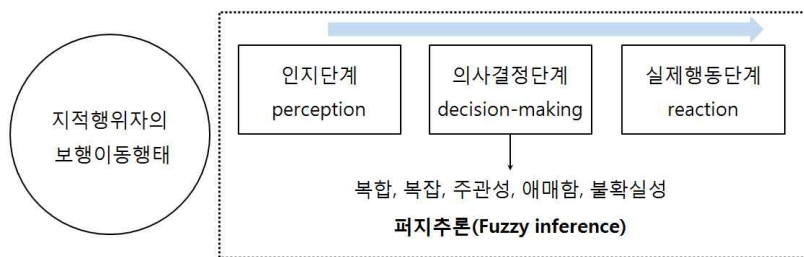


<그림 3-2> 보행이동행태의 지적 행위자

셋째, 보행이동행태 의사결정과정의 불확실성을 고려하기 위하여 퍼지 추론 접근방식을 활용한다. 개인의 의사결정과정은 다양한 요인이 복합적으로 영향을 미치며, 의사결정주체의 주관성, 애매함, 불확실성 등이 포함되기 때문에 의사결정과정을 모형화하는 것은 어렵다(Peeta and Zhou, 2004; 박희제 외, 2008). 본 연구는 인간의 의사결정과정의 애매하고 불확실한 정도를 정량화하고 모형화하는데 장점을 가진 퍼지추론을 토대로 보행이동행태모형을 구축한다. 일반적으로 인간의 행태를 수학적 모형으로 구축하기 위해서는 개인의 의사결정과정이 특정 규칙을 바탕으로 이루어진다는 가정이 필요하다. 개인은 자신의 효용을 최대로 하는 의사결정을 수행하므로 이러한 가정은 적합하며, 의사결정과정을 포함한 행태 및 행동이 반복되면 이를 규칙화하는 것이 가능하다(Helbing, 1992; Nasir et al., 2014).

넷째, 보행자의 보행이동행태는 의사결정과정과 실제행동으로 구분된다. 인간의 행태 변화를 이끄는 단계는 인지단계, 의사결정단계, 실제행

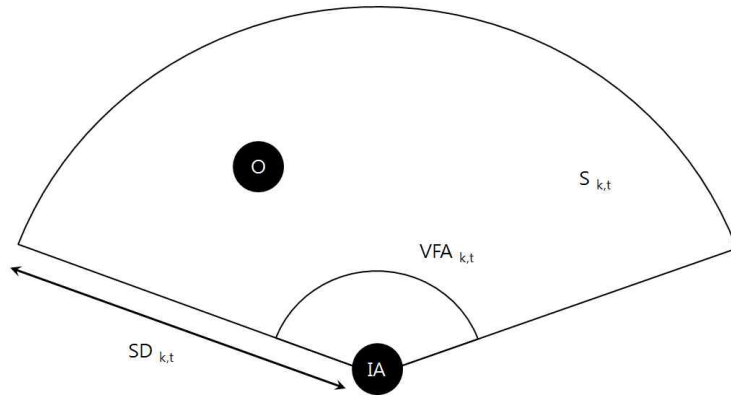
동단계로 세분될 수 있다(Helbing and Molnar, 1995). 먼저, 인간은 시각, 청각 등의 다양한 감각으로 주변상황을 인지하고 개별 판단기준에 따라 의사결정을 수행하며 결과를 실제행동으로 옮긴다. 보행자의 보행이동행태도 마찬가지이다. 보행자는 미시적 환경 조건에 대한 인지단계를 거쳐 의사결정을 내리고, 이를 토대로 실제 행동한다. 의사결정과정과 실제행동단계는 상호연관성을 갖는다.



<그림 3-3> 보행이동행태의 단계

다섯째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 시각인지는 시지각(visual perception)을 통하여 입수된 정보가 경험을 바탕으로 재해석되어서 감정이나 행동으로 나타나는 과정을 의미하며, 일반적으로 인간이 외계를 인식할 때 80% 이상의 정보를 시각을 통해 입수한다(이승재, 2013). 또한 공간인지를 통해 행태를 결정할 때 일반적으로 여러 감각 중 시각이 가장 중요한 역할을 한다(Garling and Evans, 1991). 따라서 본 연구에서는 보행자의 시야범위를 고려하여 시야범위 내의 미시적 환경조건을 대상으로 상호작용이 발생하는 것으로 가정하였다. 보행자 시야범위는 개별특성, 주변 공간특성 등에 따라 차이가 발생할 수 있으나, Fruin (1971), Harris and Dines (1988)에 근거하여 보행이동행태 영향범위를 설정하고, 이는 [식 3-1]과 같이 표현된다.

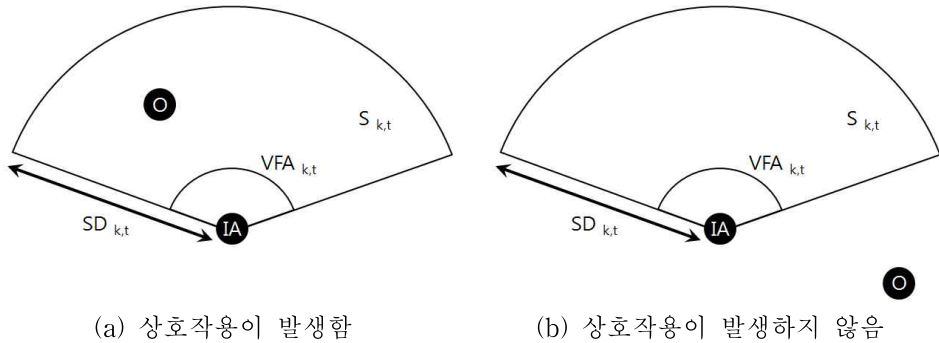
$$S_{k,t} = \frac{1}{2}(SD_{k,t})^2 VFA_{k,t} \quad [\text{식 3-1}]$$



<그림 3-4> 보행이동행태의 영향범위

여기서,  $S_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 보행이동행태 영향범위를 나타낸다.  $SD_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 가 보행에 필요한 공간거리(sensory distance)를 의미하며,  $VFA_{k,t}$ 는 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 시야각(visual field angle),  $IA$ 는 의사결정주체인 지적 행위자(intelligent agent),  $O$ 는 장애물 또는 다른 보행자(obstacle)이다.

따라서 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$  내의 미시적 환경조건을 대상으로 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 모형화하고자 한다. <그림 3-5>의  $O \notin S_{k,t}$ 의 경우(b), 즉, 장애물 또는 다른 보행자  $O$ 가 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 에 포함되지 않으면, 보행행태에 영향을 미치는 요인이 충분히 떨어진 것으로 판단하여 상호작용이 발생하지 않는다. 반면  $O \in S_{k,t}$ 인 경우(a), 즉, 장애물 또는 다른 보행자  $O$ 가 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 내에 위치하면 미시적 상호작용이 발생하며, 보행자는 영향요인을 고려하여 방향 또는 속도 수정 행태를 결정한다.



if  $O \in S_{k,t}$

if  $O \notin S_{k,t}$

<그림 3-5> 보행이동행태 영향범위와 상호작용

본 연구 목적은 보행자의 의사결정과정을 고려한 이동행태모형 개발로, 보행자의 의사결정에 영향을 미치는 요인은 크게 환경적 요인과 의사결정주체인 개인의 특성, 문제자체의 성질 등으로 구분가능하다. 먼저, 환경적 요인은 물리적 환경 요인과 사회적 환경 요인으로 세분되며, 보행자의 보행이동행태에 영향을 미치는 물리적 요인은 보행공간의 폭, 크기, 경사 등 보행공간의 속성이 해당된다. 그리고 사회적 환경 요인으로 다른 보행자 및 장애물과의 상호작용이 포함될 수 있다. 일반적으로 보행자는 다른 보행자나 장애물로부터 적정 거리를 유지하려고 하며, 가시적인 범위 내에서 충돌가능성을 발견하면 방향 또는 속도를 조정하여 충돌을 피하는 행태를 보인다. 이와는 반대로 가족이나 친구 등 동반자간에 강한 인력이 작용하는 경우도 있다. 또다른 사회적 환경 요인으로 주변 보행공간의 밀도 등이 있으며, 보행자는 혼잡정도에 따라 보행행태에 영향을 받는다.

두 번째로, 의사결정주체인 보행자의 개별특성이 의사결정과정에 영향을 줄 수 있으며, 성별, 연령, 통행목적, 문화, 성격 등이 여기에 해당된다. 관찰 조사 등과 같은 실증 자료를 통해 보행자의 개별특성이 의사결정과정에 미치는 영향을 조사하기는 어렵다. 따라서 대부분의 연구는 개별특성에 따른 거시적 보행교통류 특성차이를 분석한다. 거시적 접근의

보행교통류 특성으로 대표적인 속도, 밀도, 보행량 조사를 통해 개별특성에 따른 보행행태 차이를 알 수 있다. 일반적으로 연령이 높을수록, 여성보다는 남성이, 비업무보다는 업무 목적의 통행이 보행속도가 높은 것으로 나타나고 있다.

마지막으로 문제자체의 성질은 의사결정과정의 새로움, 불확실성, 복잡성 등을 의미한다. 보행이동행태에서 문제자체의 성질은 보행자의 주관성, 애매함 등의 특성이 포함되며, 행태에 미치는 영향요인이 다양함에 따른 복잡성, 불확실성이 이에 해당한다. 일반적으로 보행행태는 경험을 토대로 한 습관적, 직관적 행태이며, 계속적 반복으로 규칙화가 가능하지만 임의성을 가지고 있다.

## 제 2 절 보행이동행태모형 구축

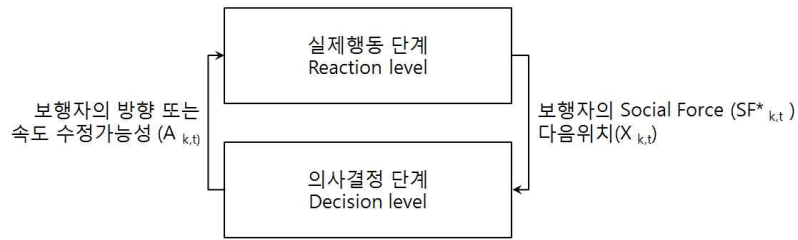
본 연구의 보행이동행태는 개별보행자 단위의 의사결정을 고려한 실행단계의 보행행태로, 의사결정단계(Decision level)와 실제행동단계(Reaction level) 두 단계로 구분된다. 의사결정단계는 보행이동행태에 미치는 영향을 고려하여 개별보행자 단위의 의사결정을 수행하고, 실제행동단계는 의사결정을 토대로 Social Force Model<sup>15)</sup>을 통해 이동행태를 구현한다. 본 절에서는 보행이동행태 모형식을 살펴보고 보행이동행태 의사결정요인 선정과 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출 방법론을 제시한다.

---

15) 본 논문 2장의 Social Force Model을 참조.

## 1. 모형식 설정

보행이동행태 모형식은 실제행동단계, 의사결정단계로 구분하여 제시한다. 먼저, 실제행동단계는 보행자의 의사결정을 토대로 실제 행동을 수행하는 단계이다. 의사결정단계에서 도출된 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 을 바탕으로 보행자의 Social Force  $SF_{k,t}^*$ 가 결정된다. Social Force Model에서 Social Force는 가속도 값으로, 이를 토대로 다음 시간대의 속도 및 위치가 결정된다.



<그림 3-6> 실제행동단계와 의사결정단계의 상호연관성

### ① 실제 행동단계

$$SF_{k,t}^* = A_{k,t} \cdot SF_{k,t} \quad [\text{식 3-2}]$$

$$\vec{x}_{k,t+1} = \vec{x}_{k,t} + \vec{v}_{k,t} + SF_{k,t}^* \cdot t \quad [\text{식 3-3}]$$

$$s.t. \quad A_{k,t} = g(\Omega(X_k), \Omega(Y_k), \Omega(Z_k)) \quad [\text{식 3-4}]$$

여기서,

$SF_{k,t}^*$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$A_{k,t}$ 을 기반으로 한 Social Force

$SF_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 Social Force. Social Force

$\vec{f}_k$ 은 목적지로 향하는 힘  $\vec{f}_k^o$ , 척력  $\sum_{\beta} \vec{f}_{k\beta}$ , 인력

$\sum_{\gamma} \vec{f}_{k\gamma}^{ATT}$  등으로 구성

$$SF_{k,t} = \vec{f}_k = \vec{f}_k^o + \sum_{\beta} \vec{f}_{k\beta} + \sum_{\gamma} \vec{f}_{k\gamma}^{ATT}$$

$A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$$A_{k,t} = \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n)$$

$X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 개별특성  $l$

$Y_k^m$  : 보행자  $k$ 의 물리적 환경 요인  $m$

$Z_k^n$  : 보행자  $k$ 의 사회적 환경 요인  $n$

$\Omega(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 각 변수별 방향 또는  
속도 수정가능성(비퍼지값)

$\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치

$\vec{x}_{k,t+1}$  : 시간  $t+1$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치(다음 시간대의 위치)

$\vec{x}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치

$\vec{v}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 속도

## ② 의사결정단계

보행이동행태모형의 의사결정단계는 보행이동행태 영향범위 내의 상호 작용을 고려하여 의사결정을 수행하는 과정이다. 의사결정단계는 시각, 청각 등 다양한 감각을 통해 주변상황을 인지하고 개인의 판단기준에 따라 수정여부를 결정한다. 즉, 보행자는 미시적 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$  내의 여러 환경조건과 상호작용하며 방향 또는 속도 수정 여부를 결



정한다. 이때, 보행이동행태 영향범위  $S_{k,t}$ 는 실제행동단계의 Social Force  $SF_{k,t}$ 을 통해 결정되고, 의사결정단계와 실제행동단계를 상호연관성을 갖는다

의사결정은 전술한 바와 같이 복잡성, 불확실성이 포함되는 문제이므로, 본 연구에서는 퍼지추론을 적용하였다. 의사결정단계의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 이 퍼지추론을 통해 산출된 값으로, 개인의 주관성, 애매함 등의 특성을 포함하고 있다. 또한 보행자의 물리적 환경 요인  $Y_k$ 과 사회적 환경 요인  $Z_k$ 는 보행자 현재위치  $\vec{x}_{k,t}$ 에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} A_{k,t} &= g(\Omega(X_k), \Omega(Y_k), \Omega(Z_k)) & [\text{식 3-5}] \\ &= \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad Y_k &= f(\vec{x}_{k,t}) & [\text{식 3-6}] \\ Z_k &= f(\vec{x}_{k,t}) \end{aligned}$$

여기서,

- $A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성
- $X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 개별특성  $l$  (연령, 성별, 보행목적)
- $Y_k^m$  : 보행자  $k$ 의 물리적 환경 요인  $m$  (보행공간 폭)
- $Z_k^n$  : 보행자  $k$ 의 사회적 환경 요인  $n$  (장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도)
- $l$  : 보행자 개별특성의 개수
- $m$  : 물리적 환경 요인의 개수
- $n$  : 사회적 환경 요인의 개수
- $\Omega()$  : 퍼지추론을 통해 도출된 각 변수별 수정가능성(비퍼지

값)

$\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치, 로짓모형의 표준화 계수를 통해 산정

$Y_k, Z_k$  :  $\vec{x}_{k,t}$ 에 의해 결정

$\vec{x}_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 위치

## 2. 보행이동행태 의사결정요인 선정

보행이동행태에 영향을 미치는 요인은 의사결정 개인의 특성(연령, 성별, 통행목적 등)과 보행공간의 물리적 환경 요인(보행공간의 크기, 경사 유무), 장애물(다른 보행자 포함)과의 상호작용을 의미하는 사회적 환경 요인에 이르기 까지 다양하다. 또한 보행자의 경험, 직관, 습관에 의한 경향과 문제자체의 복잡성 등 직접 측정하기 어려운 잠재적 요인이 보행행태에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 파일럿 조사를 거쳐 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고, 보행행태를 보다 객관화하고 실증적으로 분석하기 위하여 확률선택모형을 통한 보행자의 보행이동행태 의사결정과정을 살펴보고자 한다. 의사결정요인 선정에 필요한 자료수집은 실험분석에서 주로 사용되는 잠재선호(Stated Preference, SP)기법을 이용한다. 잠재선호기법은 통계적인 실험계획법을 통해 가상의 시나리오를 구축하고 그 가상의 시나리오를 개인에게 제공하여 개인의 선호를 찾는 일련의 기법으로써, 가상의 상황 하에서 심리적으로 내재되어 있는 개인의 선호의식 또는 의향을 조사하는 것을 목적으로 한다(김강수·조혜진, 2006).

확률효용이론에 기초를 둔 개별행태모형에서 의사결정주체인 각 개인은 자신의 효용이 최대가 되는 대안을 선택한다. 일반적으로 대안의 효용이란 개개인이 대안들 가운데 하나를 선택함으로써 얻게 되는 이익을 의미하며, 구체적으로 속성으로 구성된 대안의 총체적 매력도를 의미한다.

대안의 총 효용은 결정적 효용과 확률적 효용으로 구성되며, 전자는

관측 가능한 요소, 후자는 관측할 수 없는 효용의 요소를 의미한다. 확률적 효용의 분포에 따라 로짓모형, 프로빗모형으로 구분된다. 프로빗모형은 확률분포가 정규분포를 따르고, 이론적으로 타당성을 인정받지만 계산이 복잡하다는 한계를 가지고 있다. 반면 로짓모형은 프라빗모형의 약점을 보완하기 위해 개발되었으며, 확률분포는 Weibull분포를 가진다. 또한 로짓모형은 프로빗모형에 비해 수학적으로 간단하여 모형을 이해하기 쉽다는 장점이 있다(이희연·노승철, 2012). 따라서 본 연구에서는 로짓모형을 활용하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴본다. 보행자  $k$ 가 주어진 조건에서 속도 또는 방향을 수정( $j$ : 유지,  $i$ : 수정)할 확률은 [식 3-7]과 같다. 이를 로짓모형으로 나타내면 [식 3-8]과 같다.

$$\begin{aligned} P_k(i) &= Prob(U_{ik} \geq U_{jk}) \\ &= Prob(V_{ik} + \epsilon_{ik} \geq V_{jk} + \epsilon_{jk}) \end{aligned} \quad \text{[식 3-7]}$$

$$P_k(i) = \frac{e^{V_{ik}}}{e^{V_{ik}} + e^{V_{jk}}} \quad \text{[식 3-8]}$$

여기서,

- $P_k(i)$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 를 선택할 확률
- $U_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 총 효용
- $V_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 결정적 효용
- $\epsilon_{ik}$  : 보행자  $k$ 가 대안  $i$ 에 대해 갖는 확률적 효용

### 3. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

보행이동행태는 의사결정과정이며, 보행자의 주관성, 애매함, 불확실성 요소가 포함되므로 본 연구에서는 퍼지추론을 활용한 보행이동행태모형을 개발한다. 즉, 모형식 중 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 을 퍼지추론 과정을 통해 도출한다.

#### 1) 퍼지추론<sup>16)</sup>

##### ① 퍼지집합이론

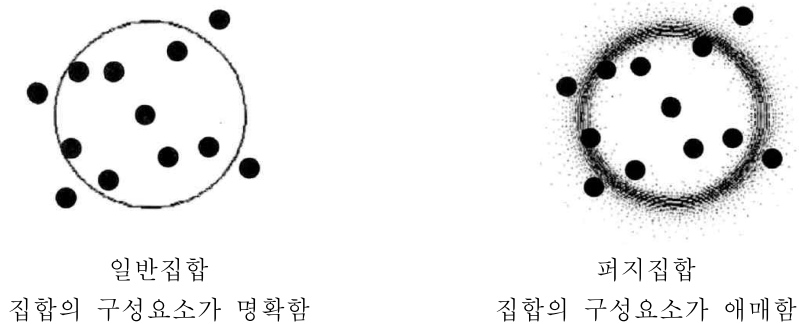
보행자의 의사결정과정을 고려하기 위한 방안으로 퍼지추론과정을 살펴보고자 한다. 퍼지추론 적용에 앞서 퍼지집합이론(Fuzzy Sets)에 대한 간단한 개념을 살펴보고자 한다. 보행자가 현재의 방향 또는 속도를 선택하는데 영향을 미치는 요인은 다양하게 나타날 수 있다. 예를 들어, ‘다른 보행자와의 거리가 가깝다.’, ‘장애물이 정면에 위치하고 있다.’, ‘주변 보행공간의 밀도가 높다.’ 등의 이유로 보행자는 유지하고 있는 속도나 방향을 변경할 수 있다. 이러한 표현은 일종의 애매한 언어적 표현이고, 보행자의 주관적 개념이다. 명확하지 않은 값을 정량화하여 수학적으로 다루고자 할 때 일반적으로 사용하는 개념이 퍼지집합이론이다. 퍼지집합이론은 인간의 언어 및 사고에 관련된 애매함(fuzziness)을 수리적으로 취급할 수 있도록 한다. 즉, 사람이 사용하는 언어적으로 애매한 표현을 효과적으로 처리할 수 있는 방법이다. 퍼지집합이론은 Zadeh에 의해 1965년 최초 제안되었고, 이후 많은 학자에 의해 체계가 성립되고 발전해 오고 있다(Tsoukalas and Uhrig, 1997).

Zadeh는 애매한 특성이 있는 언어적인 값을 정량적으로 기술하기 위해 퍼지집합을 소개하였다. 일반집합(crisp set 또는 non-fuzzy set)의 경

---

16) 임은선(2008), 채석·오영석(1995)을 재정리하였다.

우, 어떤 원소가 특정 집합에 속하는지, 그렇지 않는지에 대한 소속정도가 명확하다. 하지만 일상생활에서 집합의 구성요소를 결정하는 기준이 명확하지 않은 경우가 많으며, 집합을 구분할 때 그 소속이 애매(ambiguity)하여 정확하게 표현하기 어려운 집합이 있다. 예를 들면 ‘키가 큰 사람들의 집합’, ‘나이가 어린 사람들의 집합’ 등이 여기에 해당된다. 이를 퍼지집합이라 하며, 이렇게 애매모호한 집합의 개념을 다루는 방법을 퍼지집합이론이라 한다. 일반집합과 퍼지집합은 <그림 3-7>과 같이 표현될 수 있다.



자료: 임은선(2008).

### <그림 3-7> 일반집합(고전적 집합)과 퍼지집합의 특징

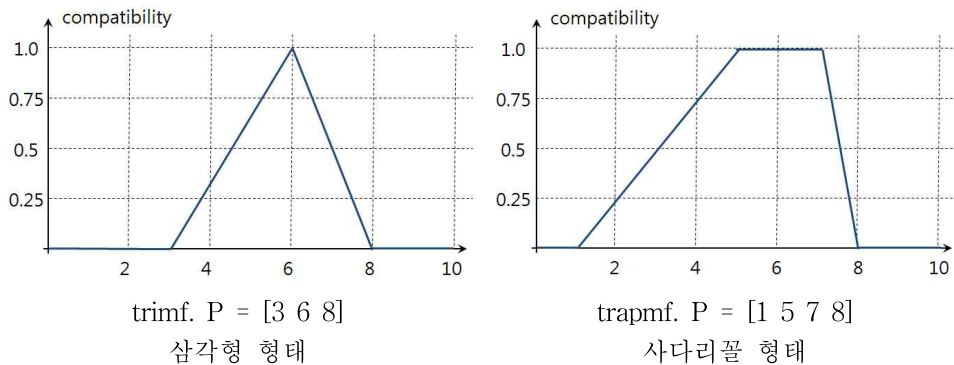
#### ② 소속도 함수

퍼지집합의 포함여부는 소속도 함수(membership function)에 속하는 정도로 표현하며, 이를 위해서는 소속도 함수에 대한 정의가 필요하다. 소속도 함수는 한 원소가 그 집합에 속하는 정도를 나타내는 함수로 소속의 정도를 0과 1사이의 값, 즉 가능성(compatibility, possibility)으로 환산한다. 구체적으로, 어떠한 퍼지변수  $x$ 가 어떠한 집합  $A$ 에 속하는 정도인 소속도  $\mu_A(x)$ 를 나타내는 함수이며, 소속도가 1에 가까우면  $x$ 가  $A$

에 속하는 정도가 높다는 것을 의미하며, 반대로 0에 가까우면 소속도가 낮다는 것을 나타낸다. 소속도 함수는 [식 3-9]와 같이 표현되며, 기본적으로 개인의 주관에 의해 정해지는 것이나, 이러한 주관의 배후에는 일종의 객관성, 공통성이 존재하여야 한다.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad \text{[식 3-9]}$$

가장 많이 쓰이고 간단한 소속도 함수의 형태는 삼각형 소속도 함수(triangular-shaped)이며, 사다리꼴(trapezoidal-shaped), 가우시안(Gaussian distribution curve)을 기반으로 한 소속도 함수 등이 있다. S자, 지수형, L-R(퍼지수를 구성하는 좌우의 부분이 각각 다른 형태로 구성) 형태 등 다양한 형태의 소속도 함수 구축이 가능하다.



자료: MathWorks(2014).

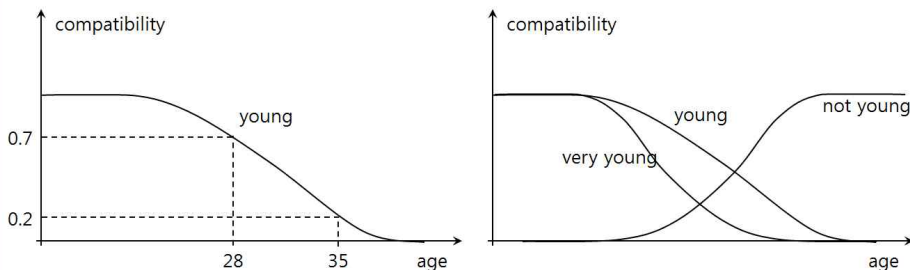
<그림 3-8> 소속도 함수의 형태

### ③ 퍼지집합이론 특성

퍼지집합이론의 가장 특징적인 강점은 부정확하거나 애매한 자료를 적

용하는데도 용이하여 언어적 변수(linguistic variable)를 정량화할 수 있다는 것이다(Zadeh, 1975). 또한 퍼지이론은 개념적으로 이해하기 쉽고, 모형이 유연하다. 임의성, 복잡성을 고려한 비선형 모형에도 이용가능하며, 전문가 경험을 기반으로 모형을 구축할 수 있고, 기존 제어기법과 조합하여 사용이 용이한 장점을 갖는다(Mathworks, 2014).

Zadeh (1975)에서는 애매한 특성이 있는 언어적 변수를 정량적으로 기술하는 과정을 소개하고 있다. <그림 3-9>는 연령(age)에 대한 표현, 즉 언어적 변수로 정량화하는 원리를 보여준다. 그래프에서 ‘젊다(young)’라고 표현하는 언어적 변수에 대한 가능성(집합에 속하는 정도)을 나타낸다. 28세는 0.7로, 35세는 0.2로 정량화된다. 이 가능성에 대한 그래프를 소속도 함수라 하며, 이를 활용하여 ‘젊다’, ‘아주 젊다’, ‘젊지 않다’ 등과 같은 언어적 변수를 표현할 수 있다.



자료: Zadeh(1975).

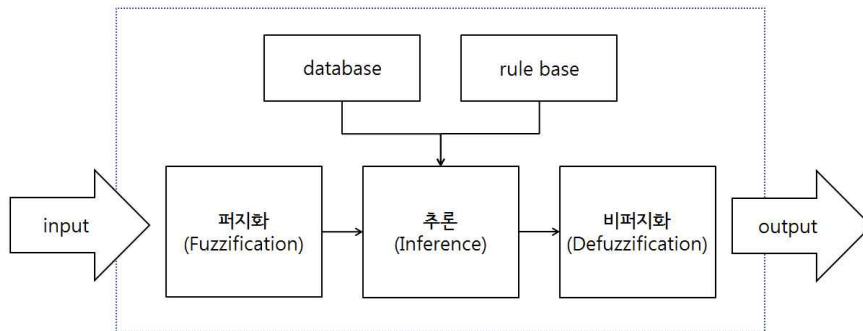
### <그림 3-9> 퍼지집합이론을 이용한 언어적 변수의 정량화

또한 퍼지집합이론을 이용하기 위해서 퍼지집합에 대한 연산을 정의하여야 한다. 일반집합과 같이 퍼지집합도 합집합, 교집합, 여집합 등의 연산이 가능하다. 이때 연산 결과는 단지 원소의 소속만을 결정하는 것이 아니라, 해당 원소의 소속 정도가 어느 정도인지를 밝히는 소속도 함수의 연산이 뒤따라야 한다. 퍼지연산은 다양한 형태를 취할 수 있는데, 일반적으로 두 퍼지집합에 대한 합집합 연산의 경우는 큰 값을 취하는

max 연산, 교집합 연산일 경우는 작은 값을 취하는 min 연산이 주로 사용된다. 또한 이 외에도 product 연산 등 다양한 종류가 있다.

#### ④ 퍼지추론

퍼지논리를 기반으로 의사결정을 수행하는 것을 퍼지추론이라 하며, 퍼지추론은 어떠한 시스템의 작동원리를 언어적 기술을 이용해서 나타내는 방법이다. 퍼지추론에서 언어적 기술은 ‘IF-THEN’ 규칙으로 표현된다. Ross (1995)에 따르면, 퍼지추론은 매우 복잡한 모형에 용이하게 사용되며, 인간의 추론·추리 과정, 지각·인지, 의사결정을 반영하고 있는 등의 장점을 가지고 있다. 퍼지추론은 애매한 상황, 불확실한 상황의 결정이 필요한 상황에 필수적 역할을 할 수 있다. 퍼지추론에서 비퍼지값(crisp value)<sup>17)</sup>을 도출하는 과정은 퍼지화(fuzzification), 추론(inference), 비퍼지화(defuzzification)의 3단계로 구분된다.



<그림 3-10> 퍼지추론 과정

17) 비퍼지값(crisp value)는 fuzzy의 반대개념으로 ‘속하는 정도’가 아닌 하나의 확실한 값을 의미한다.



## ⑤ 퍼지이론 관련 연구

본 연구에서는 보행행태에 영향을 미치는 다양한 요인에 대한 개인의 주관성과 애매함, 그리고 보행자의 의사결정과정을 보행행태모형에 반영하기 위하여 퍼지추론을 활용한다. 인간의 행태는 퍼지(주관성, 애매함, 불확실성, 부정확성) 특성을 가지고 있어, 개별행태가 기반이 되어 형성되는 교통분야에서 퍼지추론은 행태를 모형화하는데 매우 적합한 방법론 중 하나이다. Pappis and Mamdani (1977)는 교통분야에서 퍼지추론을 활용한 최초의 연구로, 독립교차로를 대상으로 신호제어전략을 수립하였다. 이를 시작으로 교통분야에서 퍼지이론이 활발하게 적용되고 있다 (Teodorovic, 1999).

교통부문에서 퍼지추론이 가장 활발하게 적용되고 있는 분야는 경로선택과 차량추종(car following), 차로변경(lane changing) 등 운전자 행태 모형 연구이다. 먼저, 경로선택은 다양한 요인에 영향을 받는 의사결정과정이므로 퍼지추론을 적용하는 사례가 많다(Teodorovic and Kikuchi, 1991; Lotan and Koutsopoulos, 1993; 남궁문 외, 1995; 이상훈 외, 2002; 이상훈·김성환, 2003; 정영근·박창호, 2005). 경로에 영향을 미치는 통행시간은 일반적으로 인지된 통행시간(perceived travel time)으로 이를 퍼지변수로 적용하여 기종점간 경로선택을 구현한 연구가 대표적이다 (Teodorovic and Kikuchi, 1991).

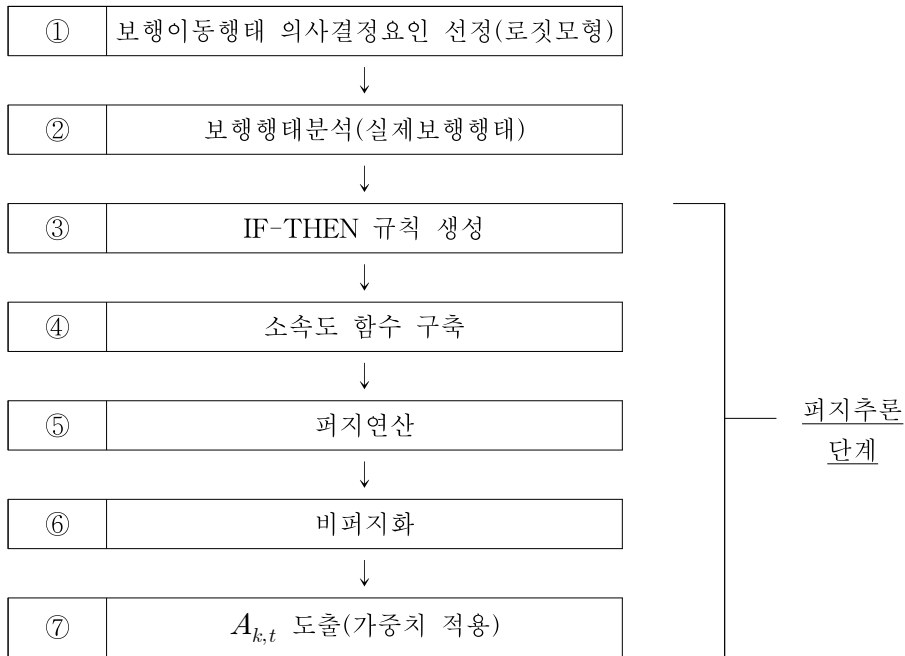
또한 개별운전자 단위의 미시적 행태모형에서도 퍼지추론 접근이 가능하다. 운전자의 행태는 주관성, 애매함 등의 퍼지한 특성을 보이고 있으며, 인간의 사고과정, 의사결정과정이 포함되어 있다. 따라서 퍼지추론은 운전자의 미시적 행태에 영향을 미치는 요인을 정량화하는데 용이한 장점을 가지고 있다(Peeta and Zhou, 2004). 정량화되기 어려운 운전자의 불안감 정도를 측정하고 이를 차량추종, 차로변경모형에 반영하는 연구가 대다수이다(박희제 외, 2008). 또한 퍼지추론은 교통사고 예측모형 등 교통의 다양한 부문에 적용되기도 한다(김장욱 외, 2006).

최근 보행행태와 관련하여 퍼지추론을 적용한 사례가 증가하고 있다.

보행자가 주변 환경으로부터 받는 정보는 애매하며, 정보를 습득하고 행태를 선택하는 과정은 인간의 의사결정, 경험적 연구를 기반으로 하므로 보행자 행태에 퍼지추론을 적용하는 접근방법은 적합하다고 할 수 있다 (Golledge et al., 1993; Gerdelen and O'Sullivan, 2010; Nashi et al., 2014). 즉, 퍼지접근방식은 보행자의 지각 반응과정의 주관성, 애매함, 복잡성을 표현하는데 적절하고 신뢰성이 높은 방법론 중 하나이다.

## 2) 퍼지추론의 적용

본 연구에서는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는데 퍼지추론을 적용한다.  $A_{k,t}$  도출 과정은 <그림 3-11>과 같이 크게 7단계로 구분된다. 먼저 로짓모형을 통해 보행이동행태 의사결정에 영향을 미치는 요인을 선정한다. 또한 설명변수와 종속변수 간의 관계를 이용하여 IF-THEN 규칙을 생성한다. 각각의 변수에 대해 애매하고 불확실한 정도를 정량화하기 위한 소속도 함수를 구축하고, 이때 실제 보행행태분석을 통해 퍼지변수의 소속도를 설정한다. 이 후, 퍼지연산을 통해 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부 관계를 정의하고, 비퍼지화 과정을 통해 각 변수별 비퍼지값인 보행자의 속도 및 방향 수정가능성을 산출한다. 일반적으로 보행자의 행태에 영향을 미치는 여러 가지 요인을 종합적으로 고려하기 위하여 변수간 중요도를 통해 최종  $A_{k,t}$  값을 도출한다. 변수간 중요도는 로짓모형 결과를 활용한다.



<그림 3-11> 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정

#### ① IF-THEN 규칙

퍼지추론의 IF-THEN 규칙은 하나의 언어적 변수가 다른 변수에 의존하는 것을 설명하는 조건문이며, 의사결정과정을 표현한다. 함축관계라 불리며, 일반적 형태는 [식 3-10]과 같다.

*IF premise (antecedent), THEN conclusion (consequent).*

*IF x is A, THEN y is B.* [식 3-10]

IF-THEN 규칙 ‘IF x is A, THEN y is B.’에서 ‘x is A’는 조건부(premise 또는 antecedent), ‘y is B’는 결론부(conclusion 또는 consequent)라 하며, 조건부는 객관적 사실을, 결론부는 이를 통해 추론

된 상황을 나타낸다(Ross, 1995). 즉, IF-THEN 규칙은 연역적 추론으로 조건부의 소속도 함수  $\mu_A(x)$ 와 결론부의 소속도 함수  $\mu_B(x)$ 를 연결하는 역할을 한다.

본 연구에서 보행자의 보행이동행태(방향 또는 속도 수정)를 추론하기 위해 생성한 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부는 <표 3-1>과 같다. 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  도출을 위한 IF-THEN 규칙의 경우, 조건부는 보행자의 방향 또는 속도(가속도)에 영향을 미치는 다양한 요인을 대상으로 한다. 조건부 변수는 의사결정 보행자의 개별특성, 보행공간의 물리적, 사회적 환경 요인으로 구분된다. 또한 결론부는 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 으로 정의된다.

**<표 3-1> IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부**

구분	내용
조건부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 의사결정 개인(보행자) 특성: 연령, 성별, 통행목적 등</li> <li>• 보행공간의 물리적 속성: 크기, 경사 등</li> <li>• 보행공간 내 사회적 환경 요인(장애물 및 다른 보행자와의 상호작용): 장애물과의 거리, 각도, 상대속도, 주변밀도 등</li> </ul>
결론부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성</li> </ul>

일반적으로 IF-THEN 규칙은 직관적 추론을 근거로 하나, 본 연구에서는 모형의 객관성을 향상시키기 위해, 로짓모형을 토대로 IF-THEN 규칙을 생성하였다.

## ② 소속도 함수 구축

소속도 함수는 언어적 정보를 수학적으로 구현한 것을 의미하며, 언어의 부정확성과 이를 정량화하는 것에 초점을 맞춘다. 예를 들어, ‘장애물과의 거리가 가깝다.’, ‘장애물이 나의 정면에 위치한다.’ 등이 소속도 함

수를 통해 확률로 표현된다.

소속도 함수를 구성하는 것은 중요한 단계이나, 일반적으로 휴리스틱 하거나 주관적 기준에 의해 결정하는 경우가 많다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해, 보행이동행태 분석을 통해 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도 등 실측 자료를 바탕으로 소속도 함수를 구축하고자 한다. 함수 구축은 <표 3-1>의 조건부와 결론부 퍼지변수를 대상으로 한다.

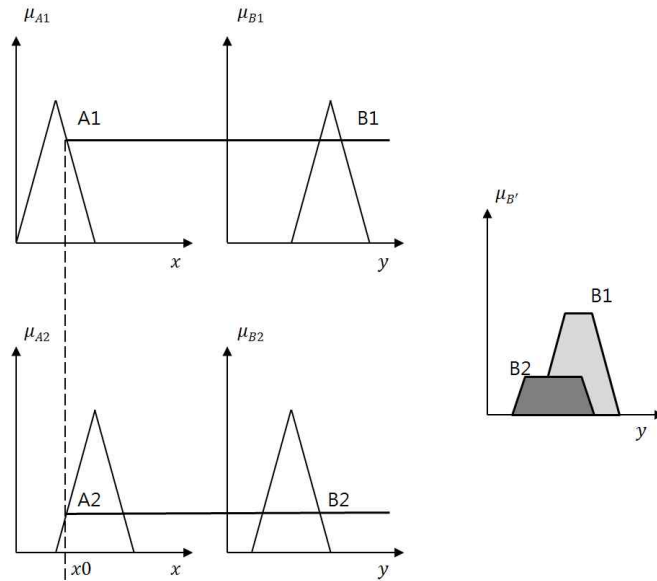
### ③ 연산자

연산자는 IF-THEN 규칙의 조건부와 결론부를 연결하는 관계를 의미하며, 본 연구에서는 가장 일반적인 Mamdani 형태의 연산자를 사용하였다. Mamdani 형식은 직접 추론법 중 하나로 퍼지 함축(implication)시 최소값  $\min$  연산자를 사용하고, 합성(composition)시 최대-최소 max-min 연산을 사용하는 것으로 퍼지추론에서 가장 대표적으로 활용되는 기법이다. 즉, 보행자의 조건부 속성(A)와 연산자  $R$ 에 기반하여 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성(B:  $A_{k,t}$ )을 도출하며, 이러한 관계식은 [식 3-11]과 같이 표현 가능하다.

$$B_i^* = A_i^* \circ R \quad \text{[식 3-11]}$$

$$\begin{aligned} R &= A \times B \\ &= \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \end{aligned}$$

여기서,  $R$ 는 보행자의 조건부 속성  $A_i$ 로부터 결론부 속성  $B_i$ 를 도출해 내는 연산자를 의미한다.



<그림 3-12> Mamdani type의 퍼지추론 연산

#### ④ 비퍼지화를 통한 비퍼지값 도출

비퍼지화는 퍼지추론에서 얻어진 퍼지 결과값을 애매성이 존재하지 않는 비퍼지값으로 변환하는 과정이다. 추론된 출력 퍼지값들에 대응되는 수치들 중 가장 적당한 값을 선택하는 과정으로, 일반적으로 널리 이용되는 비퍼지화 방법은 무게중심법(centroid of area method), 최대값평균법(mean of maximum method) 등이 있다. 무게중심법은 가장 많이 사용되는 비퍼지화 방법으로, 퍼지추론의 결과로 얻어진 퍼지집합의 무게중심을 비퍼지값( $x^*$ )으로 정의한다. 어떤 변수  $x$ 가 어떤 집합  $A$ 에 속하는 정도를  $\mu_A(x)$ 라 할 때, 무게중심법을 활용한 비퍼지값은 [식 3-12]와 같이 표현된다. 최대값평균법은 가능성이 최대로 되는 값들의 평균값을 비퍼지값( $x^*$ )으로 정의하며, [식 3-13]과 같다.

$$x^* = \frac{\int x \cdot \mu_A(x) dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad [\text{식 3-12}]$$

$$x^* = \sum_{m=1}^M \frac{x_m}{M} \quad [\text{식 3-13}]$$

여기서,  $x_m$ 는 소속도 함수가 최대값일 때의  $x$ 값을 의미하고,  $M$ 는 소속도 함수 중 제어함수의 개수이다.

본 연구에서는 무게중심법을 이용하여 각 변수의 방향 또는 속도 수정가능성 값을 산출한다. 일반적으로 Mamdani 형식 추론법에서는 무게중심법이 주로 활용된다. 비퍼지화 과정을 통해 조건부 변수(요인 변수) 각각의 수정가능성 값이 비퍼지값으로 도출된다. 개별변수의 비퍼지값은 [식 3-14]로 표현된다.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad [\text{식 3-14}]$$

여기서,

$x^*$  : 개별변수의 방향 또는 속도 수정가능성

$n$  : 변수별 규칙의 개수

##### ⑤ 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

최종적으로 다양한 요인을 고려한 종합적인 방향 또는 속도 수정가능성은 변수의 중요도를 통해 산정되며 [식 3-15]와 같다. 이때 변수의 중

요도는 로짓모형의 변수별 표준화 계수를 토대로 한다.

$$A_{k,t} = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot y_k^{*,j} \quad [\text{식 3-15}]$$

여기서,

$A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성

$y_k^{*,j}$  : 요인  $j$ 의 퍼지추론을 통해 산출된 비퍼지값

$N$  : 요인의 개수

$\omega_j$  : 변수  $j$ 의 가중치



## 제 4 장 보행이동행태모형 정산

### 제 1 절 보행이동행태 의사결정요인 선정

본 절에서는 보행행태를 보다 객관적이고 실증적으로 분석하기 위하여 확률선택모형을 통해 보행이동행태 의사결정요인을 선정하였다. 먼저 보행이동행태의 선호도를 살펴보기 위해 설문조사를 실시하고, 선호조사 결과를 통해 퍼지추론 과정에서 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고, 개별행태를 반영한 IF-THEN 규칙을 생성하였다.

#### 1. 보행이동행태 선호조사

##### 1) 예비조사

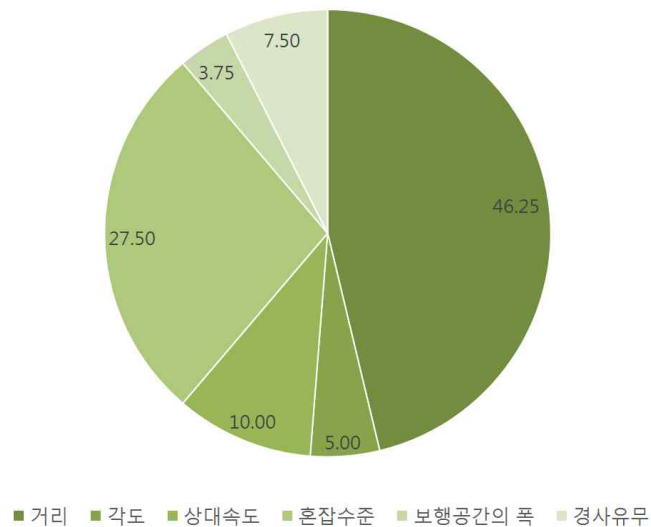
본 조사에 앞서, 파일럿 조사를 통해 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고자 하였다. 보행이동행태에 영향을 미치는 대표적 요인은 <표 4-1>과 같다.

파일럿 조사 결과, 보행이동행태에 가장 큰 영향을 미치는 상위 6개 변수는 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 혼잡수준(밀도), 보행공간의 폭, 경사유무 등이다. 먼저, 보행 속도 또는 방향 수정에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 ‘장애물 또는 다른 보행자와의 거리’로, 응답 비율이 전체의 46.25%를 차지하였다. 이어서, ‘보행공간의 혼잡수준(밀도)’라고 응답한 비율이 27.50%였으며, ‘다른 보행자와의 상대속도(본인에게 다가옴 또는 멀어짐)’가 영향을 미친다는 의견이 전체 응답자의 10.00%로 조사되었다. 물리적 환경 요인인 ‘보행공간의 폭’이 보행행태에 영향을 미친다고 응답한 비율은 3.75%로 가장 낮게 나타났

으며, ‘장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도’, ‘응답자가 위치한 보행 공간의 경사유무’가 각각 5.00%, 7.50%로 관찰되었다.

<표 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인

요인		응답수(명)	비율(%)
사회적 환경 요인	장애물 및 다른 보행자와의 거리	37	46.25
	장애물 및 다른 보행자가 위치한 각도	4	5.00
	상대속도	8	10.00
	혼잡수준(밀도)	22	27.50
물리적 환경 요인	보행공간의 폭	3	3.75
	보행공간의 경사유무	6	7.50



보행자의 보행행태는 보행공간의 크기, 폭, 경사 등과 같은 물리적 환경 요인과 다른 보행자와의 상호작용을 포함하는 사회적 환경 요인에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 선행연구를 살펴보면, 물리적, 사회적 요인 외에도 연령, 성별, 통행목적 등 보행자의 특성이 보행행태에 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Daamen, 2004).

장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 혼잡수준, 폭, 경사 유무 등 응답 비율이 높은 상위 6개 요인 외에 다양한 요인이 보행이동행태에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. <표 4-2>에서 보행행태에 영향을 미치는 기타 요인을 환경 요인, 개별특성 등으로 분류하고 상세내용을 제시하고 있다. 보행행태에 영향을 줄 수 있는 기타 요인을 살펴보면, 먼저 물리적 환경 요인인 보도표면상태가 있다. 보행자는 현재 보행하고 있는 보도의 포장여부, 평탄성 등 보도표면상태에 영향을 받으며, 이는 보행 속도와 질, 심리적 측면까지 영향을 미칠 수 있다.

또한, 동행자 유무, 동행자의 통행속도, 유아동반 여부 등 동행자로 인해, 보행자는 방향 또는 속도를 선택하는 행태에 영향을 받는 것으로 조사되었다. 기존 연구 역시 1인 보행자에 비해 보행규모가 커지면 보행속도는 감소하는 것으로 조사되고 있다(오성훈·이소민, 2013). 또한 지하철, 버스 등 대중교통의 도착, 친구와의 약속 등 시간 제약이 보행행태에 영향을 미친다고 응답한 의견도 있었다. 실증적으로, 교통수단을 이용하거나 통근을 목적으로 하는 보행자들이 일반 시간 제약이 없는 보행자에 비해 보행속도가 빠른 것으로 보고되고 있다(Finnis and Walton, 2008). 마지막으로, 기상상태, 보행공간 청결도와 같은 쾌적성, 위협여부 등이 보행행태에 영향을 미치는 것으로 나타났고 보행이동행태에 미치는 영향요인은 매우 다양한 것으로 조사되었다.

<표 4-2> 보행이동행태 기타 영향요인

구분		내용
물리적 환경 요인	보도	보도 포장여부, 평탄성 등
사회적 환경 요인	동행자	동행자의 보행속도, 동행자 유무, 동행자와의 대화, 동행자의 연령(유아, 고령자 등)
	주변 환경	상업시설, 광고물 등 외부 매력요인
	장애물 및 다른 보행자	장애물의 크기
	돌발상황	사고, 재난, 응급상황 등
보행자 개별특성	제약조건	대중교통 도착시간, 신호 등의 시간적 제약
	소지품	소지품 유무, 크기, 무게, 통화, 휴대폰 사용 등
기타	기상상태	비, 눈 등 기상상태
	쾌적성	보행공간의 청결도
	위험성	위험이 느껴지는 상대
	보행공간의 규칙	우측통행 등의 보행규칙

## 2) 본 조사

### ① 조사개요

파일럿 조사를 통해 본 연구에서는 보행이동행태(방향 또는 속도 수정 행태)에 영향을 미치는 주요 요인을 설정하고 해당 요인에 대한 개인의 보행이동행태 선호조사를 시행하였다. 즉, 보행행태에 영향을 미치는 요인에 대한 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 조사하는 것이 본 선호조사의 핵심내용이다.

조사의 개요는 <표 4-3>과 같다. 먼저, 조사는 2015년 9월 15일~9월

30일 2주간 실시하였으며, 보행의 경우, 인간의 기초적 행태이므로 조사가 용이한 집단을 조사대상집단으로 선정하였다. 실험조사대상은 서울대학교 환경대학원 대학원생 및 가족을 대상으로 하였으며, 총 표본크기는 80명이다. 연령대별(20대, 30대, 40대, 50대 이상) 25%, 성별 비율 5:5로 표본을 할당하고, 조사형식은 1대1 대인면접을 통해 설문을 시행하였다.

<표 4-3> 보행이동행태 선호조사 개요

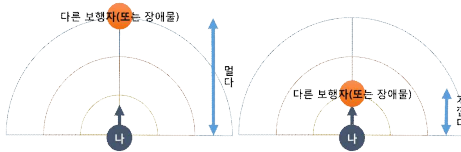
구분		내용
조사기간		2015년 9월 15일~9월 30일 2주간
조사방법		1대1 대인면접조사
조사대상집단		서울대학교 환경대학원 대학원생 및 가족
표본크기		80명
주요 조사내용	응답자 특성	연령, 성별, 통행목적, 통행빈도
	보행이동행태 선호조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>장애물 또는 다른 보행자와의 거리</li> <li>장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도</li> <li>다른 보행자와의 상대속도</li> <li>보행자가 위치한 공간의 폭</li> <li>보행공간의 밀도</li> <li>보행공간의 경사유무</li> </ul> 등의 요인이 보행자의 속도 및 방향 수정가능성에 미치는 영향 조사

파일럿 조사를 통해 응답비율이 높은 상위 6개 요인을 본 조사에 적용하였다. 장애물 또는 다른 보행자와의 거리(가깝다-멀다), 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도(정면-측면), 장애물 또는 다른 보행자와의 상대속도(다가옴-멀어짐), 보행자가 위치한 보행공간의 폭, 경사유무, 보행공간의 밀도(혼잡수준) 등 총 6개 요인으로, 본 연구에서는 이를 대상으로 선호조사 설문을 설계하였다. 더불어, 로짓모형 추정을 위해 선정된 개별특성변수는 보행자의 연령, 성별, 통행목적, 통행빈도 등이다.

## 장애물과의 거리

멀다

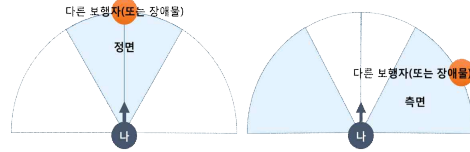
가깝다



## 장애물이 위치한 각도

정면

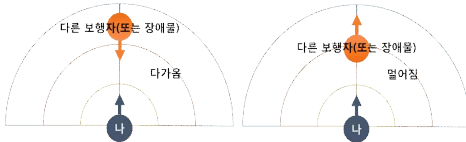
측면



## 상대속도

다가움

멀어짐



## 보행공간의 폭

넓다

좁다

보행자의 시야 확보가 충분한 곳

예) 보행광장, 대합실 등

물리적 장애물 등으로 인해 보행자의 시야 확보가 어려운 곳

예) 좁은 통로 등

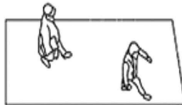
## 보행공간의 혼잡수준(밀도)

혼잡하지 않다

혼잡하다

보행속도 또는 방향 변경이 자유로움

보행속도 또는 방향을 자유롭게 변경할 수 있는 충분한 보행공간이 확보되어 있다



보행속도 또는 방향 변경에 제약 있음

모든 보행자는 보행속도 또는 방향을 임의대로 선택할 수 없는 상태이다



## 보행공간의 경사유무

경사가 없다

경사가 있다

예) 평지



예) 계단, E/S



<그림 4-1> 보행이동행태 주요 영향요인

<표 4-4> 보행이동행태 의사결정요인 변수설정

구분	내용
환경 요인	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장애물 또는 다른 보행자와의 거리</li> <li>• 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도</li> <li>• 다른 보행자와의 상대속도</li> <li>• 보행자가 위치한 공간의 폭</li> <li>• 보행공간의 밀도</li> <li>• 보행공간의 경사유무</li> </ul>
개별특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보행자의 연령</li> <li>• 보행자의 성별</li> <li>• 통행목적(업무통행과 비업무통행으로 구분)</li> <li>• 통행빈도(보행교통 빈도)</li> </ul>

## ② 조사설계

선호의식 자료수집에 있어서, 응답자의 심리적 부담을 줄이고 보다 정확한 자료구축을 위해 설문내용을 간략하게 구조화 하였으며, 6개의 요인 각 인자에 대해 2가지 수준으로 구분하였다. 요인별 수준 설정은 <표 4-5>와 같다.

<표 4-5> 영향요인과 수준설정

요인 수준	거리	각도	상대속도	공간 폭	밀도	경사
1수준	멀다	정면	멀어짐	좁다	높다	없다
2수준	가깝다	측면	다가옴	넓다	낮다	있다

완전배치 요인설계<sup>18)</sup>로 설문을 구성할 경우, 질문의 양이 많아져 응답

18) 완전배치 요인설계는 속성변수와 수준의 모든 경우와 조합을 고려하는 경우를 의미한다.

자의 피로를 유발하고, 응답오차가 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 설문지의 효율향상을 위해 실험계획법<sup>19)</sup> 중 부분배치 요인설계를 이용하였다. 부분배치 요인설계는 주어진 선택대안 및 수준수의 모든 조합을 고려하지 않고 상호작용의 일부분만을 고려하는 설계방법을 의미한다. 본 연구에서는 직교계획(orthogonal design)을 활용하여 <표 4-5>의 총 6개 변수, 2가지 수준에 대해 총 8개의 가상상황 시나리오를 작성하였다. 최종 선정된 가상 시나리오는 <표 4-6>과 같다. 또한 시나리오별 보행자의 속도 및 방향 수정에 대한 응답을 리커트식 척도(likert scale)로 측정하여 선호조사를 수행하였다. 응답자의 이해를 돕기 위해 가상상황에 대한 시나리오를 그림과 함께 제시하였다. 보행이동행태 설문조사지는 부록에 첨부하였다.

<표 4-6> 보행이동행태 선호조사를 위한 시나리오

시나리오	거리	각도	상대속도	공간 폭	밀도	경사
1	멀다	측면	멀어짐	좁다	낮다	있다
2	가깝다	측면	다가옴	넓다	낮다	있다
3	가깝다	정면	멀어짐	좁다	높다	있다
4	멀다	측면	다가옴	좁다	높다	없다
5	가깝다	정면	다가옴	좁다	낮다	없다
6	가깝다	측면	멀어짐	넓다	높다	없다
7	멀다	정면	다가옴	넓다	높다	있다
8	멀다	정면	멀어짐	넓다	낮다	없다

19) 실험계획법은 관심 있는 가상적인 상황을 정밀하게 검증하기 위해 속성변수와 수준을 조합하는 일련의 방법이라 할 수 있다. 즉, 주어진 속성변수와 수준을 이용하여 통계적인 방법으로 최소의 질문에서 최대의 선호 정보를 얻을 수 있도록 가상적인 상황을 만드는 일련의 과정이라 할 수 있다(김강수·조혜진, 2006).



### ③ 조사결과

먼저 설문조사의 연령, 성별, 통행목적 등 응답자 특성을 요약하면 <표 4-7>과 같다. 응답자의 통행목적은 출퇴근, 등하교 등의 업무 목적으로 주로 보행한다고 응답한 비율이 전체의 57.5%였으며, 쇼핑, 여가 및 오락 등의 목적은 42.5%이다. 통행빈도에 대한 응답 결과는 전체 응답자의 76.3%가 주 3회 이상 보행하는 것으로 응답하였으며, 주 1회 미만으로 보행하는 응답자는 전체의 3.8%에 해당한다.

<표 4-7> 응답자 특성 조사 결과

구분		응답수(명)	비율(%)
성별	남성	40	50.0
	여성	40	50.0
연령 (평균 : 40.6세 표준편차 : 13.0세 최소~최대 : 21~67세)	20대(21세 이상 30세 미만)	20	25.0
	30대(31세 이상 40세 미만)	20	25.0
	40대(41세 이상 50세 미만)	20	25.0
	50대(51세 이상 60세 미만)	10	12.5
	60대(61세 이상 70세 미만)	10	12.5
통행목적	업무, 출퇴근, 등하교 등	46	57.5
	비업무(쇼핑, 여가 및 오락 등)	34	42.5
통행빈도	주 7회	31	38.8
	주 3회 이상~7회 미만	30	37.5
	주 1회 이상~3회 미만	16	20.0
	주 1회 미만	3	3.8

또한 각 요인에 대한 보행이동행태 선호조사 결과, 시나리오 8(장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 멀고, 정면에 장애물 또는 다른 보행자가 위치하고 있으며, 의사결정 보행자와 멀어지는 방향으로 이동한다. 현재

보행공간은 평지이며 폭은 넓다. 그리고 혼잡하지 않다.)의 경우, 방향 또는 속도를 수정한다고 답한 응답자수는 2명으로 전체의 2.5%에 불과한 것으로 나타났다. 반면, 시나리오 5(장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가깝고, 정면에 장애물 또는 다른 보행자가 정면에 위치하고 있으며, 의사결정 보행자에게 다가오는 방향으로 이동한다. 현재 보행공간은 평지이며 폭은 좁다. 그리고 혼잡하지 않다.)의 경우 전체의 93.8%인 75명이 방향 또는 속도를 수정한다고 답하였다. 8개의 가상 시나리오별 방향 또는 속도 수정가능성 응답결과는 <표 4-8>과 같다.

<표 4-8> 시나리오별 수정가능성 응답결과

시나리오	가상상황	5점 척도 평균	방향 또는 속도 수정가능성*		수정 비율 (%)
			유지	수정	
1	거리(멀다), 각도(측면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(좁다), 밀도(낮다), 경사(있다)	1.99	73	7	8.8
2	거리(가깝다), 각도(측면), 상대속도(다가옴), 공간폭(넓다), 밀도(낮다), 경사(있다)	3.69	29	51	63.8
3	거리(가깝다), 각도(정면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(좁다), 밀도(높다), 경사(있다)	3.43	44	36	45.0
4	거리(멀다), 각도(측면), 상대속도(다가옴), 공간폭(좁다), 밀도(높다), 경사(없다)	2.74	63	17	21.3
5	거리(가깝다), 각도(정면), 상대속도(다가옴), 공간폭(좁다), 밀도(낮다), 경사(없다)	4.61	5	75	93.8
6	거리(가깝다), 각도(측면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(넓다), 밀도(높다), 경사(없다)	2.70	58	22	27.5
7	거리(멀다), 각도(정면), 상대속도(다가옴), 공간폭(넓다), 밀도(높다), 경사(있다)	3.08	53	27	33.8
8	거리(멀다), 각도(정면), 상대속도(멀어짐), 공간폭(넓다), 밀도(낮다), 경사(없다)	1.50	78	2	2.5

주: \* 속도 또는 방향을 유지하는 경우와 수정하는 경우는 각각 리커트식 척도 1, 2, 3과 4, 5로 구분된다(본 논문의 pp. 80~81 참조).

## 2. 보행이동행태 의사결정요인 선정결과

### 1) 변수설정

보행이동행태는 보행자가 행태를 변경하는 경우와 그렇지 않은 경우로 한정되기 때문에 본 연구는 이항선택상황에 해당한다. 따라서 이항로짓모형을 통해 의사결정요인을 분석하고 이때 설명변수는 <표 4-9>와 같이 설정하였다. 보행자 특성과 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 폭 등과 같은 속성들은 방향 또는 속도를 수정하거나 유지하는 2가지 대안 중 한쪽을 선택하게 되는 경우 얻게 되는 효용을 만들어낸다. 보행이동행태에서 대안의 효용은 보행자가 주변 미시적 상호작용으로부터 느끼는 만족도와 관련되어 있다.

<표 4-9> 로짓모형의 설명변수 설정

변수		내용	
개별특성	연령	실제나이	
	성별	남자: 1, 여자: 0	
	통행목적	통근, 통학 등 업무: 1 쇼핑, 오락 등 비업무(여가): 0	
	통행빈도	주 7회: 3, 주 3회 이상~7회 미만: 2, 주 1회~3회 미만: 1, 주 1회 미만: 0	
보행특성 변수	사회적 요인	거리	가깝다: 1, 멀다: 0
		각도	정면: 1, 측면: 0
		상대속도	다가옴: 1, 멀어짐: 0
		주변밀도	낮음: 1, 높음: 0
	물리적 요인	공간크기(폭)	좁다: 1, 넓다: 0
		경사	없다: 1, 있다: 0

본 연구는 보행이동행태에 영향을 미치는 요인을 선정하고 IF-THEN 규칙 생성, 변수간 가중치를 산정하기 위해 선호조사를 수행하였다. 이에 통행빈도에 따라 4개 카테고리로 구분하고, 통행빈도와 수정가능성은 선형관계로 가정하였다.

보행이동행태 의사결정요인 선정을 위한 로짓모형에서 방향 또는 속도 수정여부를 결정하는 대안의 결정적 효용은 [식 4-1]과 같이 구성된다.

$$V = \alpha_0 + \sum_{l=1}^l \beta_l X_k^l + \sum_{m=1}^m \gamma_m Y_k^m + \sum_{n=1}^n \delta_n Z_k^n \quad [\text{식 4-1}]$$

여기서,

$\alpha_0$  : 상수

$X_k^l$  : 보행자  $k$ 의 특성

연령, 성별, 보행목적, 통행빈도 등

$\beta_l$  : 개별특성(연령, 성별, 보행목적, 통행빈도)의 상관계수

$Y_k^m$  : 물리적 환경 요인

보행공간의 폭, 경사유무 등

$\gamma_m$  : 물리적 환경 요인(공간 폭, 경사)의 상관계수

$Z_k^n$  : 사회적 환경 요인

미시적 상호작용에 영향을 주는 요인으로 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도와 보행자가 위치한 보행공간의 혼잡정도를 나타내는 밀도 등이 포함

$\delta_n$  : 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 혼잡정도)의 상관계수

로짓모형을 추정함에 있어, 선호조사의 리커트식 척도(1~5)와 이항로

깃모형(0, 1)간 일관성을 유지시킬 필요가 있다. 리커트식 척도에서 중간 응답(mid-point)에 대한 분석방법은 다양하다. 일반적으로 응답자는 의견에 확신이 없는 경우(undecided) 또는 실제 중립(neutral) 상황일 경우 중간응답을 하는 것으로 나타나고 있다(Armstrong, 1987).

보행이동행태에 있어 현재의 방향 또는 속도를 유지하는 것 보다 수정하는데 의사결정자의 노력이 더 필요하고, 본 연구 목적이 보행자의 방향 또는 속도 수정행태에 영향을 미치는 명확한 요인을 선정하고 영향정도를 분석하기 위함이므로 리커트식 척도의 중간응답(3: 그저 그렇다)은 방향 또는 속도를 유지하는 대안으로 포함하였다.

본 연구에서는 선호조사에서 ‘1: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 전혀 없다.’, ‘2: 가능성이 낮다.’, ‘3: 그저 그렇다.’로 응답한 경우를 방향 또는 속도를 유지하는 것으로 분류하고, ‘4: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.’, ‘5: 매우 높다.’의 경우를 속도 또는 방향을 수정하는 것으로 설정하였다. 또한 해당 경우가 유지(1, 2), 수정(3, 4, 5)로 분류한 경우에 비해 로짓모형의 적합도를 의미하는 우도비( $\rho^2$ )가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.<sup>20)</sup> 선호조사의 리커트식 척도(1~5)와 이항로짓모형(0, 1)간 일관성을 고려한 종속변수는 <표 4-10>과 같다.

<표 4-10> 이항로짓모형의 종속변수 설정

구분	내용
방향 또는 속도를 유지함(0)	<p>리커트식 척도 1, 2, 3으로 설정</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 전혀 없다.</li> <li>• 2: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.</li> <li>• 3: 그저 그렇다.</li> </ul>
방향 또는 속도를 수정함(1)	<p>리커트식 척도 4, 5로 설정</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.</li> <li>• 5: 속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.</li> </ul>

20) 유지(1, 2), 수정(3, 4, 5)로 분류한 경우 모형의 우도비는 0.277이다.

## 2) 추정 결과

80명을 대상으로 각 8개 시나리오에 대해 조사하여 모두 640개 선호의 식자료를 수집하고, 이항로짓모형을 적용하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 로짓모형의 추정결과는 <표 4-11>과 같다. 먼저 모형의 적합도를 나타내는 우도비( $\rho^2$ )는 0.307이고, 적중률(hit ratio)은 평균 79.5%로 모형의 설명력은 비교적 높은 수준으로 나타났다. 또한 연령, 성별, 통행목적, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 보행공간의 폭의 추정계수가 10% 수준에서 유의미한 것으로 분석되었다.

연령 변수의 추정계수는 -0.035로 음(-)의 부호를 가지고 있고, P값은 0.000으로 1% 수준에서 유의미한 것으로 나타났다. 이는 동일한 보행조건에서 고령자일수록 방향 또는 속도 수정가능성이 줄어드는 것을 의미한다. 성별의 추정계수는 0.434로, 여자보다 남자의 방향 또는 속도 수정가능성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 통행목적은 비업무에 비해 업무통행의 보행자가 수정가능성이 높은 것으로 설명되나, 이는 10% 수준에서만 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

또한 사회적 환경 요인의 영향 정도를 살펴보면, 장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가까울수록, 측면보다는 정면에 장애물이 위치할수록 방향 또는 속도 수정가능성이 높아지는 것으로 나타났다. 상대속도는 의사결정자에게 다가올수록, 또한 보행공간의 폭이 좁을수록 수정가능성 값이 높아지는 것으로 분석되었다.

<표 4-11> 로짓모형 추정결과

종속변수 (수정=1, 유지=0)					
변수명	추정 계수	표준오차	유의 확률	Odds비	표준화 계수
상수	-3.003	0.545	0.000		
연령	-0.035	0.008	0.000	0.965	-0.253
성별	0.434	0.209	0.038	1.544	0.120
목적	0.364	0.219	0.097	1.439	0.099
빈도	0.129	0.125	0.303	1.137	0.060
거리	2.426	0.247	0.000	11.314	0.669
각도	0.830	0.232	0.000	2.294	0.229
상대속도	2.045	0.246	0.000	7.730	0.564
폭	0.508	0.217	0.019	1.662	0.140
밀도	0.125	0.241	0.603	1.133	0.035
경사	0.111	0.231	0.630	1.118	0.031
표본크기	640				
logL	-292.335				
logL0	-421.838				
우도비( $\rho^2$ )	0.307				
적중률	0.795				
표본구성 (표본크기, 구성비율)	1(수정)	237		37.0%	
	0(유지)	403		63.0%	

반면 통행빈도, 보행공간의 혼잡수준(밀도), 공간의 경사 등의 변수는 본 연구의 설문조사에서 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 보행이동행태는 인간의 기본적, 기초적 보행행태로 통행빈도와는 상관성이 부족한 것으로 판단된다. 그러나 공간의 혼잡수준, 경사 유무에는 영향을 받는 것으로 조사된 연구도 있다(Cheung and Lam, 1998; 윤상원·

배상훈, 2007). 경사의 상, 하행 구간에 따라 보행행태는 차이가 있고, 혼잡구간에서 보행자의 방향 또는 속도 수정행태는 의사결정과정으로 설명되기에는 한계가 있으므로, 본 연구에서는 해당 변수는 제외하고 유의미한 변수만을 대상으로 보행이동행태모형을 개발하였다.

일반적으로 추정계수가 a일 때, 설명변수의 단위를 하나 증가시키면 종속변수에서 a로짓 만큼의 증가가 있다고 해석된다. 따라서 추정계수보다 Odds비<sup>21)</sup>가 모형을 설명하는 데 해석이 용이한 경우가 있다. Odds비는 카테고리 구분별 Odds를 비교하는 값으로, Odds비가 1보다 큰 경우 양(+)의 관계를 가지고 있으며, 1보다 작은 경우는 음(-)의 관계를 나타낸다.

예를 들어 성별의 경우, Odds비는 1.544로 나타났으며, 여성에 비해 남성의 Odds가 1.544배인 것을 의미한다. 다른 요인이 동일한 상황에서 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률을 살펴보면, 남성이 여성에 비해 방향 또는 속도를 수정할 확률이 54.4% 높은 것으로 나타났다(<표 4-12> 참조).

**<표 4-12> 성별에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화**

구분		방향 또는 속도 수정 확률	수정 확률의 변화량	Odds	Odds비
성별	여성	21.0		0.266	
	남성	29.1	8.1	0.410	1.544

또한 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률을 살펴보면 추정계수는 -0.035로 고령자일수록 보행행태를 수정하고자 하는 확률을 낮아지는 것으로 나타났다. 연령 증가에 따른 수정 확률 변화량은 29~30세의 경우 -0.9포인트 감소하며, 연령이 1살 많아질수록 방향 또는 속도를 수정할

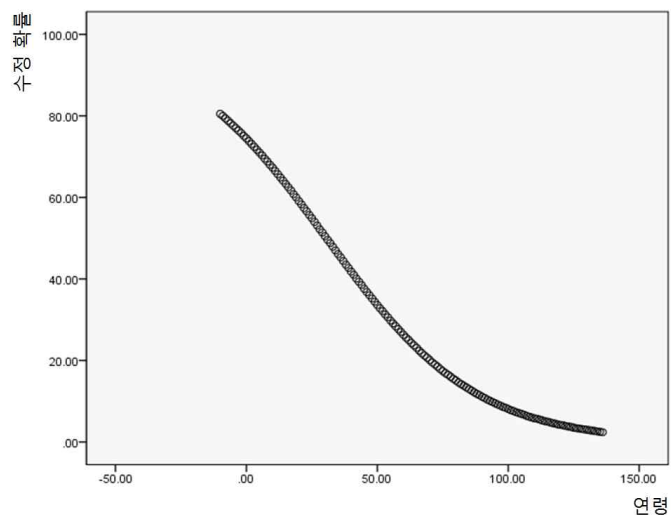
21) Odds은 어떠한 사건이 일어날 확률과 일어나지 않을 확률 간의 비율을 의미하며, Odds비는 비교 대상이 되는 그룹 간의 Odds을 비교한 값이다.



가능성은 3.5% 감소하는 것으로 설명된다(<표 4-13> 참조). 수정확률을 그래프로 표현하면 <그림 4-2>와 같이 로지스틱 함수 형태로 나타난다.

<표 4-13> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률 변화와 Odds변화

구분		방향 또는 속도 수정 확률	수정 확률의 변화량	Odds	Odds비
연령	29	51.4		1.057	
	30	50.5	-0.9	1.020	0.965
	31	49.6	-0.9	0.985	0.965



<그림 4-2> 연령에 따른 방향 또는 속도 수정 확률

## 제 2 절 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출

보행이동행태모형 구축을 위한 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 추정하기 위하여 퍼지추론을 활용하였다. 퍼지추론은 크게 IF-THEN 규칙 생성, 소속도 함수 구성, 연산, 비퍼지화 과정으로 구분되며, 이를 통해 도출되는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$ 은 [식 4-2]와 같다. 보행행태에 영향을 미치는 요인은 앞서 추정한 로짓모형을 토대로 유의미한 변수를 대상으로 하였다.

$$\begin{aligned}
 A_{k,t} &= \sum_{l=1}^L \omega_l \Omega_l(X_k^l) + \sum_{m=1}^M \omega_m \Omega_m(Y_k^m) + \sum_{n=1}^N \omega_n \Omega_n(Z_k^n) & [\text{식 4-2}] \\
 &= \omega_1 \Omega_A(X_k^A) + \omega_2 \Omega_G(X_k^G) + \omega_3 \Omega_P(X_k^P) + \omega_4 \Omega_S(Y_k^S) \\
 &\quad + \omega_5 \Omega_D(Z_k^D) + \omega_6 \Omega_{AN}(Z_k^{AN}) + \omega_7 \Omega_R(Z_k^R)
 \end{aligned}$$

여기서,

- $A_{k,t}$  : 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 방향 또는 속도 수정가능성  
(변수간 가중치를 적용한 최종 비퍼지값을 의미)
- $X_k^l$  : 개별특성(연령, 성별, 통행목적)
- $Y_k^m$  : 물리적 환경 요인(보행공간 폭)
- $Z_k^n$  : 사회적 환경 요인(장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도)
- $\Omega_A(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 연령에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_G(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 성별에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_P(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 통행목적에 따른 수정가능성(비퍼지값)

- $\Omega_S(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 보행공간의 폭에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_D(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물과의 거리에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_{AN}(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\Omega_R(\cdot)$  : 퍼지추론을 통해 도출된 장애물의 상대속도에 따른 수정가능성(비퍼지값)
- $\omega_i$  : 변수  $i$ 의 가중치
- $i$  : 보행이동행태 영향요인 개수

즉, 보행자의 개별특성, 물리적 환경 요인, 사회적 환경 요인을 통해 보행자는 방향 또는 속도 수정가능성을 결정한다. 그리고  $\Omega$ 는 퍼지추론을 통해 도출되는 비퍼지값을 의미한다.

## 1. IF-THEN 규칙

퍼지추론의 IF-THEN 규칙은 일반적으로 전문가 의견, 기존 연구, 객관적 사실 등을 통해 언어를 기반으로 만들어질 수 있다. 보행이동행태는 외부(물리적 요인, 사회적 요인 등)로부터 받아들이는 지각에 의존하는 행태이므로, 이는 IF-THEN 규칙으로 구성이 가능하다.

본 연구에서는 로짓모형에서 선정된 유의미한 변수만을 대상으로 하며, 설명변수와 종속변수 간 상관관계를 고려하여 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 결과, 본 연구의 IF-THEN 규칙은 기존 연구와 유사한 행태를 보이는 것으로 나타났다. IF-THEN 규칙은 조건부와 결론부로 구성되며, 전자는 보행자의 개별특성, 환경 요인 등이 포함되며, 후자는 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성이다. 예를 들면, ‘장애물 또는 다른 보행자와의 거리가 가까우면, 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높

다.’ ‘연령이 높을수록, 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 낮다.’ 등으로 설정될 수 있으며, 조건부 변수, 결론부 변수 등은 상, 중, 하 등 몇 개의 수준으로 구분가능하다. 실제로 연령 또는 거리 등 보행이동행태에 영향을 미치는 요인과 위 단계는 정확히 매칭될 수 없기 때문에 퍼지추론이 필요하며, 퍼지이론을 통해 언어적 주관성을 정량화한다. 본 연구의 IF-THEN 규칙은 <표 4-14>와 같다.

<표 4-14> IF-THEN 규칙 생성

구분	조건부	결론부
연령	if(보행자의 나이가 어리다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자의 나이가 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(보행자의 나이가 많다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
성별*	if(보행자는 남자다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자는 여자다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
통행목적*	if(보행자의 통행목적은 업무관련이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(보행자의 통행목적은 여가관련이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
장애물과 의 거리	if(장애물과 거리가 가깝다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(장애물과 거리가 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(장애물과 거리가 멀다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)

<표 4-14> 계속

구분	조건부	결론부
장애물이 위치한 각도	if(장애물이 보행자의 정면에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(장애물이 보행자의 정면과 측면 중간에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(장애물이 보행자의 측면에 위치한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
상대속도	if(다른 보행자가 다가온다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(동일한 속도로 이동한다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)
	if(다른 보행자가 멀어진다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
보행공간 폭	if(보행공간의 폭이 넓다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 낮다)
	if(보행공간의 폭이 보통이다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다)
	if(보행공간의 폭이 좁다)	then(방향 또는 속도 수정가능성이 높다)

주: \* 조건부 변수 중 성별, 통행목적은 경계가 명확한 일반집합에 해당한다.

## 2. 소속도 함수

퍼지변수의 소속도 함수는 퍼지변수의 값을 0과 1사이의 값으로 표현한 것이며, 변수의 확률값을 의미한다. 원소가 집합에 속하는 정도는 언어의 부정확성을 정량화하는 기능을 가진다(Peeta and Yu, 2002).

본 연구에서는 IF-THEN 규칙의 조건부, 결론부에 해당하는 퍼지변수를 대상으로 소속도 함수를 구성하였다. 소속도 함수 구축에 있어, 일부 영상자료 분석을 통해 자료 구득이 가능한 변수는 실제 행태를 바탕으로

하고, 그 외 변수는 객관적 사실을 근거로 설정하였다. 소속도 함수는 삼각형 형태(trimf)와 사다리꼴 형태(trapmf)를 주로 사용하였다.<sup>22)</sup> 일반적으로 소속도 함수가 삼각형이면 퍼지수의 표현이 간단하고 또한 연산이 비교적 간단하므로 흔히 사용되고 있다(채석·오영석, 1995).

## 1) 영상자료 분석

보행자의 방향 또는 속도 수정 행태에 미치는 영향을 현장 조사를 통해 알아내기는 쉽지 않다. 그러나 제한적 요인이라도 보다 실증적이고 객관적인 자료를 수집하고 이에 따른 보행행태를 모형화하기 위해 본 연구에서는 영상자료 분석을 통해 보행행태를 살펴보았다. 본 분석의 주목적은 보행자와 미시적 환경조건과의 상호작용을 분석하여 퍼지변수의 소속정도를 결정하는 소속도 함수를 구축하기 위함이다.

일반적으로 보행행태 조사는 크게 속도, 밀도, 보행량 등 거시적 수준의 변수 조사가 대다수이다. 거시적 보행교통류 특성은 보행자와 장애물 또는 다른 보행자간의 상호작용, 개인의 의사결정과정, 사회적, 심리적 요인 등 미시적 보행행태를 설명하지 못한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 영상자료 분석을 통해 개별보행자 단위의 행태를 살펴보고자 하였고, 방향 또는 속도 수정 행태 중 방향 수정 행태에 초점을 맞추어 조사하였다.

먼저 보행자 궤적정보를 토대로 회피시작 시점<sup>23)</sup>에서 장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물이 위치한 각도 등을 조사하였다. 여기서 회피시작 시점은 관측자료로 판단하기 어려우므로 장애물이 보행자의 진행방향에 존재하며 일반적인 이동방향 변화량(평균)보다 방향이 크게 변하는 경우로 설정하였다(성기범 외, 2011).

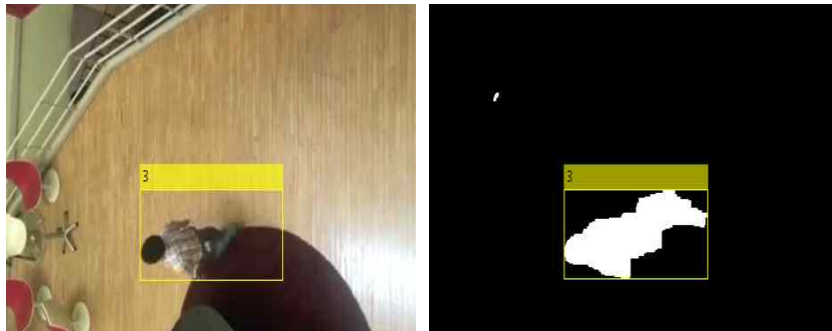
보행자 궤적정보는 Matlab 중 Computer Vision System Toolbox<sup>24)</sup>의

---

22) trimf는 Triangular shaped membership function, trapmf는 Trapezoidal shaped membership function의 약자이다.

23) 보행자의 방향 또는 속도 수정 의사결정이 이루어진 시점을 의미한다.

Motion-Based Multiple Object Tracking을 활용하였다. Motion-Based Multiple Object Tracking은 물체의 움직임을 기반으로 궤적을 추정하는 방법으로 각 프레임 내의 이동물체를 검지하여 시간에 따른 궤적정보를 산출한다. 이때 이동물체 검지에는 가우시안 혼합 모델(gaussian mixture model)<sup>25)</sup>을 활용한 배경제거 알고리즘을 이용되고, 동일한 물체의 궤적은 칼만 필터(kalman filter)<sup>26)</sup>에 의해 추정된다. 본 연구에서는 보행 영상자료로 개별보행자의 궤적을 산출하고, 이상치를 제거한 후 미시적 보행행태를 실증적으로 살펴본다.



<그림 4-3> Matlab의 이동물체 검지

영상자료를 통한 보행행태 분석을 위해, 먼저 분석에 필요한 변수를

- 
- 24) Matlab의 Computer Vision System Toolbox은 컴퓨터 비전, 영상처리와 관련된 설계, 시뮬레이션을 위한 알고리즘, 기능 및 애플리케이션을 제공하며, detection·extraction·matching, object detection·tracking, motion·estimation, video processing 등의 분석이 가능하다(Mathworks, 2014).
- 25) 가우시안 혼합 모델은 여러 개의 가우시안 확률밀도함수로 데이터의 분포를 모델링하는 방법이다. 영상에서 각각의 픽셀값에 해당하며 배경의 학습을 통해 배경모델이 형성되며 이를 이용해 이동물체를 검지한다.
- 26) 칼만 필터는 예측단계와 보정단계의 두 단계로 구성된 필터로 먼저 이전 시간에 추정된 상태에 대해 예상되는 상태를 계산한다. 예측단계와 실제측정상태를 토대로 정확한 상태로 보정한다. 이를 통해 물체의 궤적정보를 생성한다.

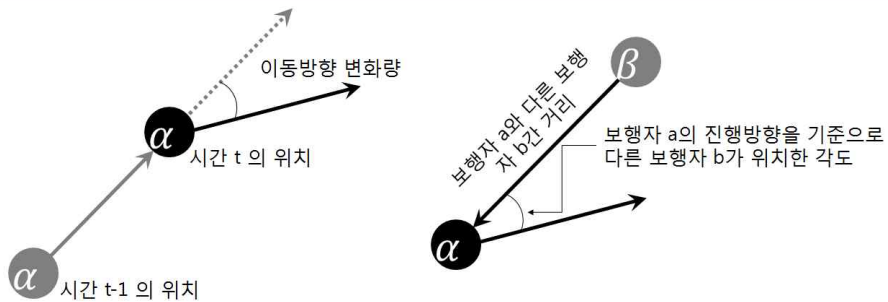
다음과 같이 정의하였다.

① 보행자  $\alpha$ 의 보행 특성변수

시간  $t$ 에서 의사결정주체 보행자  $\alpha$ 를 기준으로 현재위치  $\vec{x}_{\alpha,t}$ , 현재 속도  $\vec{v}_{\alpha,t}$  ( $\vec{v}_{\alpha,t} = \vec{x}_{\alpha,t} - \vec{x}_{\alpha,t-1}$ )를 벡터로 표현하고, 시간  $t-1$ 의 진행방향과 시간  $t$ 의 진행방향의 차를 이동방향 변화량  $\theta_{\alpha,t}$  ( $\vec{v}_{\alpha,t-1} \cdot \vec{v}_{\alpha,t} = |\vec{v}_{\alpha,t-1}| |\vec{v}_{\alpha,t}| \cos \theta_{\alpha,t}$ )으로 설정하였다.

② 장애물 또는 다른 보행자  $\beta$ 와의 상호작용 특성변수

의사결정주체 보행자  $\alpha$ 와 다른 보행자  $\beta$ 와의 상호작용을 산출하기 위한 변수로, 시간  $t$ 에서 보행자  $\alpha$ 가 다른 보행자  $\beta$ 를 향하는 벡터  $\vec{n}_{\alpha\beta,t}$  ( $\vec{n}_{\alpha\beta,t} = \vec{x}_{\alpha,t} - \vec{x}_{\beta,t}$ )와 보행자  $\alpha$ , 다른 보행자  $\beta$ 간 거리  $d_{\alpha\beta,t}$  ( $d_{\alpha\beta,t} = |\vec{n}_{\alpha\beta,t}| = |\vec{x}_{\beta,t} - \vec{x}_{\alpha,t}|$ ), 시간  $t$ 에서 의사결정 보행자  $\alpha$ 의 진행방향을 기준으로 다른 보행자  $\beta$ 가 위치한 각도  $\theta_{\alpha\beta,t}$  ( $\vec{n}_{\alpha\beta,t} \cdot \vec{v}_{\alpha,t} = |\vec{n}_{\alpha\beta,t}| |\vec{v}_{\alpha,t}| \cos \theta_{\alpha\beta,t}$ ) 등을 산정하여 보행행태를 분석하였다.



<그림 4-4> 영상자료 분석을 위한 보행특성변수



③ 회피시작 시점  $t_A$ 에서의 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도

회피시작 시점은 장애물이 보행자의 진행방향에 존재하며 보행자의 이동방향 변화량  $\theta_{\alpha,t}$ 이 일반적인 이동방향 변화량(평균)  $\theta_{\alpha,AVG}$ 보다 크게 변하는 경우로 설정하였다. 즉  $\theta_{\alpha,t} > \theta_{\alpha,AVG}$ 일 때, 시간  $t$ 를 회피시작 시점으로 정의하고 이때 이동방향 변화량은  $\theta_{\alpha,t_A}$ 이다.

회피시작 시점에서, 장애물 또는 다른 보행자와의 거리는  $d_{\alpha\beta,t_A} = \left| \vec{n}_{\alpha\beta,t_A} \right|$ 이며, 장애물 또는 다른 보행자가 위치한 각도는  $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ 이다.

## 2) 보행이동행태 분석결과

본 연구에서는 보행행태에 영향을 미치는 요인 중 수집이 가능한 장애물과의 거리  $d_{\alpha\beta,t_A}$ , 의사결정자 진행방향을 기준으로 장애물이 위치한 각도  $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ 에 대한 실제 행태를 살펴보았다. 먼저, 두 변수의 기술통계를 살펴보면, 회피시작 시점  $t_A$ 에서 장애물까지 거리의 평균은 3.423m이며, 표준편차는 1.192m로 나타났으며, 장애물이 위치한 각도는 보행자의 진행방향을 기준으로 평균 13.331°로 나타났으며, 표준편차는 6.815°이다(<표 4-15> 참조).

<표 4-15> 회피시작 시점에서 장애물과의 거리, 각도 특성

(단위: m, °)

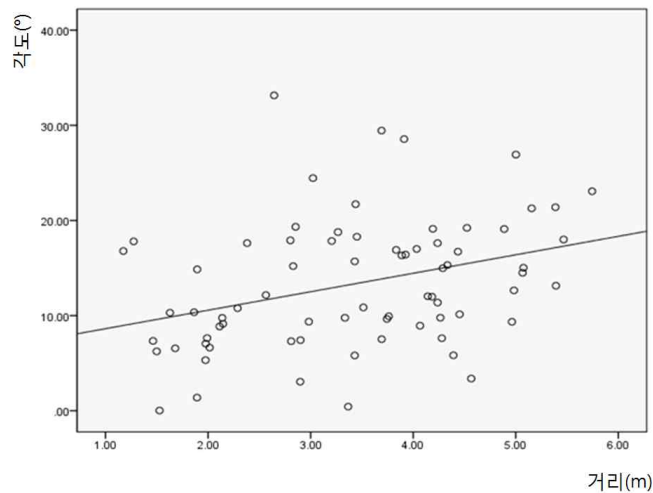
구분	표본크기	최소값	최대값	평균	표준편차
거리( $d_{\alpha\beta,t_A}$ )	73	1.174	5.744	3.423	1.192
각도( $\theta_{\alpha\beta,t_A}$ )	73	0.020	33.150	13.331	6.815

두 변수간 상관관계를 살펴보면 <표 4-16>, <그림 4-5>와 같이 회피시작 시점에서, 장애물까지 거리와 진행방향을 기준으로 장애물이 위치한 각도는 양(+)의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

<표 4-16> 거리, 각도 간 상관관계

구분		각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )
거리 ( $d_{\alpha\beta, t_A}$ )	Pearson 상관계수	0.340***
	유의확률 (양쪽)	0.003
	표본크기	73

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 90%, 95%, 99% 수준에서 유의함을 의미함.



<그림 4-5> 회피시작 시점에서 거리와 각도 관계

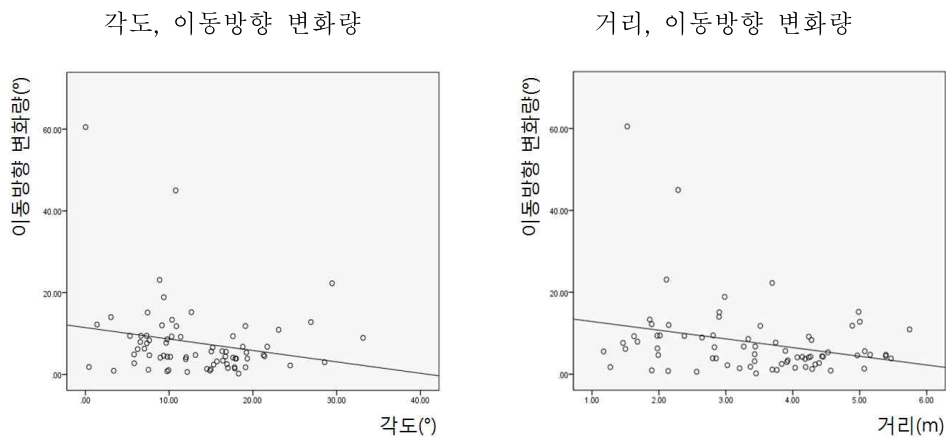
회피시작 시점에서 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 선정한 장애물과의 거리( $d_{\alpha\beta, t_A}$ ), 장애물이 위치한 각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )변수와 의사결정 보행자의 이동방향 변화량( $\theta_{\alpha, t_A}$ )간 상관계수 값은 크지 않지만, 음(-)의 상관관계

를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 장애물과의 거리가 가까울수록 이동방향 변화율(회피각)은 커지고, 장애물이 위치한 각도 역시, 정면에 장애물이 위치할수록 이동방향 변화율은 큰 것으로 분석되었다(<표 4-17>, <그림 4-6> 참조).

<표 4-17> 요인변수와 회피시작 시점의 이동방향 변화량 간 상관관계

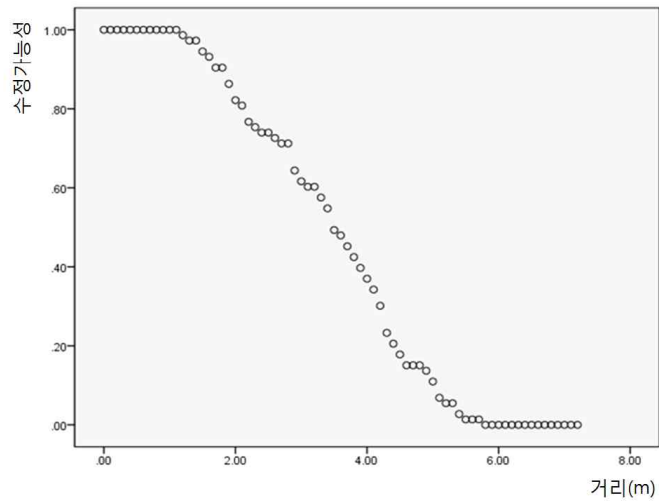
구분		거리 ( $d_{\alpha\beta, t_A}$ )	각도( $\theta_{\alpha\beta, t_A}$ )
이동방향 변화량 ( $\theta_{\alpha, t_A}$ )	Pearson 상관계수	-0.276**	-0.208*
	유의확률 (양쪽)	0.018	0.078
	표본크기	73	73

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 90%, 95%, 99% 수준에서 유의함을 의미함.



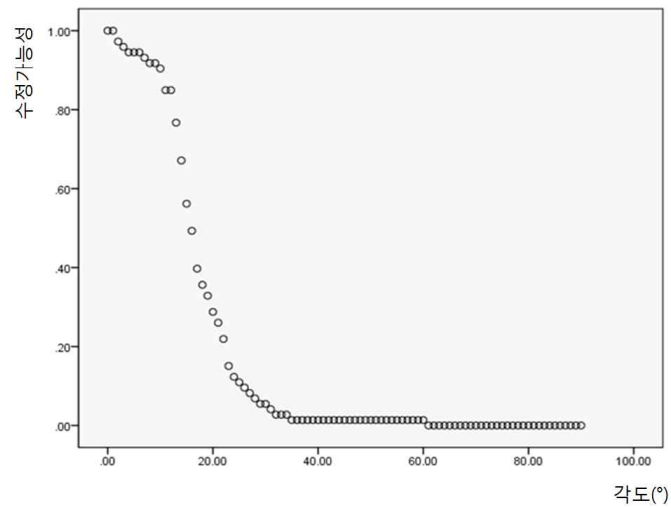
<그림 4-6> 요인변수와 이동방향 변화량 관계

각 변수별 빈도를 살펴보면 <그림 4-7>, <그림 4-8>과 같다. 먼저, 장애물과의 거리가 멀어질수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 낮아지는 형태로 나타났으며, 이는 로지스틱 곡선 형태를 보인다.



<그림 4-7> 장애물까지 거리와 수정가능성 관계

또한 장애물이 보행자 진행방향을 기준으로 정면에 위치할수록 수정가능성은 높은 것으로 나타났다.



<그림 4-8> 장애물이 위치한 각도와 수정가능성 관계

### 3) 소속도 함수 구성

연령, 성별, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도, 공간의 폭 등 유의미한 변수를 조건부 퍼지변수로 설정하여 소속도 함수를 구축하였다. 영상자료를 통해 추정이 가능한 거리, 각도 변수는 특성분석을 통해 소속도 함수를 구성하였다.

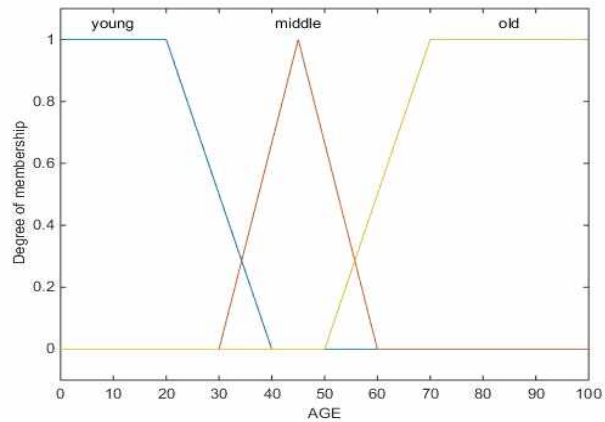
<표 4-18> 퍼지변수 설정

구분	조건부	결론부
보행자 개별특성	연령, 성별*, 통행목적*	보행자의 방향 또는 속도 수정가능성( $A_{k,t}$ )
사회적 환경 요인	장애물 및 다른 보행자와의 거리, 장애물 및 다른 보행자가 위치한 각도, 타 보행자와의 상대속도	
물리적 환경 요인	보행공간의 폭	

주: \* 조건부 변수 중 성별, 통행목적은 경계가 명확한 일반집합에 해당한다.

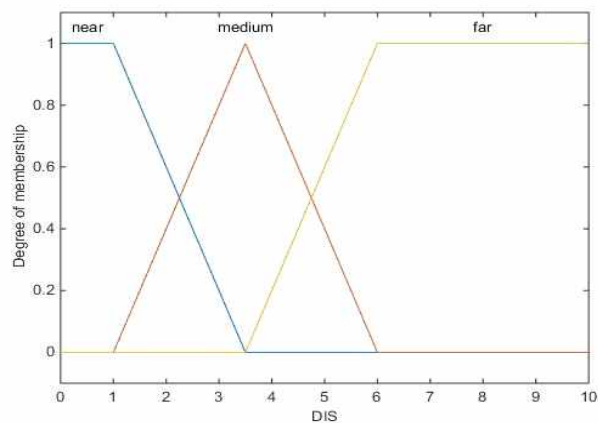
<표 4-19> 연령 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
young	보행자의 나이가 어리다.	trapmf	[0, 0, 20, 40]
middle	보행자의 나이가 보통이다.	trimf	[30, 45, 60]
old	보행자의 나이가 많다.	trapmf	[50, 70, 100, 100]



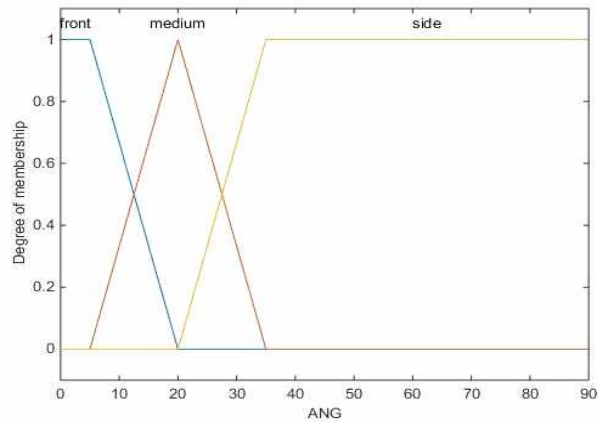
<표 4-20> 장애물과의 거리 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
near	장애물과 거리가 가깝다.	trapmf	[0, 0, 1, 3.5]
medium	장애물과 거리가 보통이다.	trimf	[1, 3.5, 6]
far	장애물과 거리가 멀다.	trapmf	[3.5, 6, 10, 10]



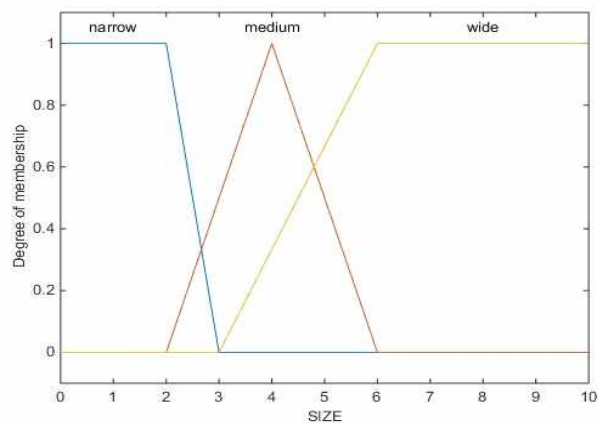
<표 4-21> 장애물이 위치한 각도 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
front	장애물이 정면에 위치하고 있다.	trapmf	[0, 0, 5, 20]
medium	장애물이 중간에 위치하고 있다.	trimf	[5, 20, 35]
side	장애물이 측면에 위치하고 있다.	trapmf	[20, 35, 90, 90]



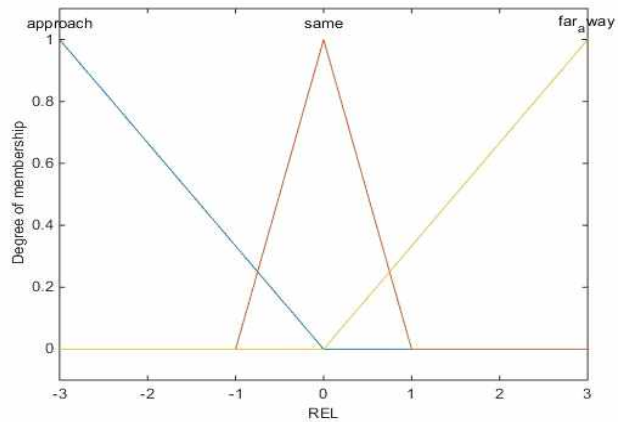
<표 4-22> 보행공간의 폭 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
narrow	보행공간의 폭이 좁다.	trapmf	[0, 0, 2, 3]
medium	보행공간의 폭이 보통이다.	trimf	[2, 4, 6]
wide	보행공간의 폭이 넓다.	trapmf	[3, 6, 10, 10]



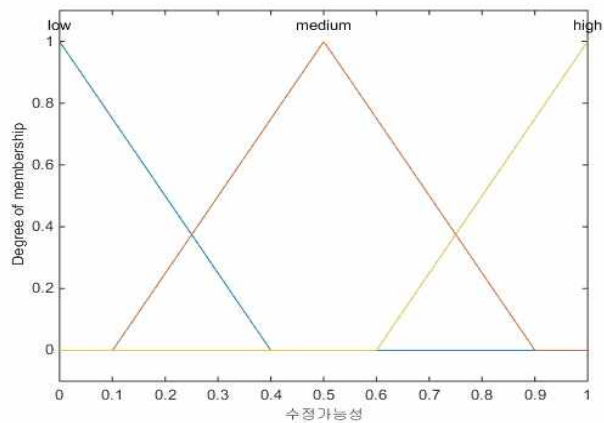
<표 4-23> 상대속도 변수의 소속도 함수

구분		형태	파라미터
approach	다른 보행자가 다가온다.	trimf	$[-3, -3, 0]$
same	동일한 속도로 이동한다.	trimf	$[-1, 0, 1]$
far away	다른 보행자가 멀어진다.	trimf	$[0, 3, 3]$



<표 4-24> 보행자 방향 또는 속도 수정가능성 변수의 소속도 함수

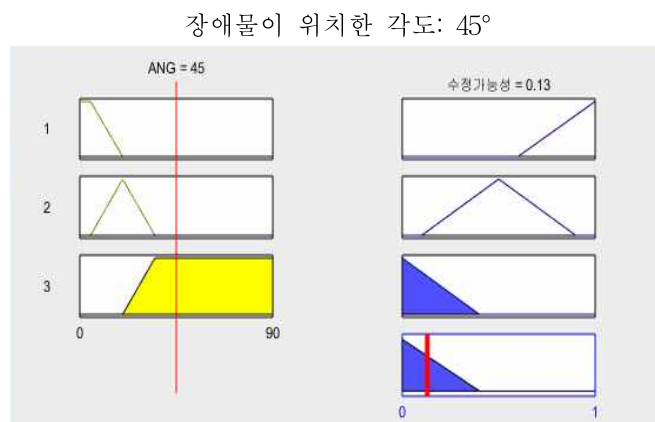
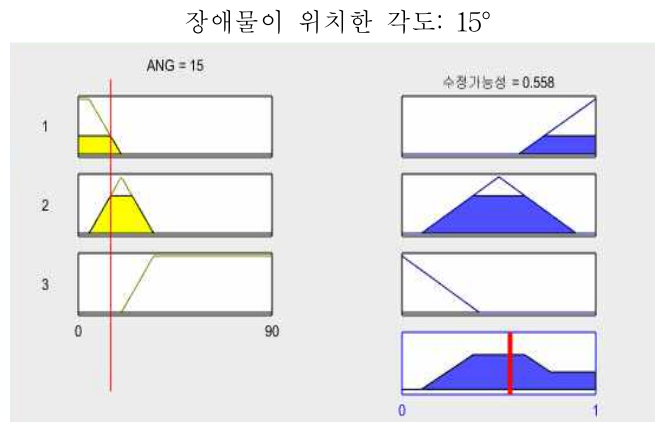
구분		형태	파라미터
low	방향 또는 속도 수정가능성이 낮다.	trimf	$[0, 0, 0.4]$
medium	방향 또는 속도 수정가능성이 보통이다.	trimf	$[0.1, 0.5, 0.9]$
high	방향 또는 속도 수정가능성이 높다.	trimf	$[0.6, 1, 1]$





### 3. 퍼지연산 및 비퍼지화

퍼지연산은 Mamdani 형식을 적용하고 비퍼지화는 무게중심법을 이용하여 산출하였다. 일반적으로 Mamdani 추론법은 무게중심법을 주로 사용하여 비퍼지값을 산출한다(채석·오영석, 1995). 장애물이 위치한 각도에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성 도출과정을 살펴보면 <그림 4-9>와 같다.



<그림 4-9> 장애물이 위치한 각도에 따른 수정가능성 도출과정

예를 들어 장애물이 보행자의 정면을 기준으로 15°에 위치한 경우, 이때 15°는 장애물이 위치한 각도 변수의 front(정면) 집합과 medium(정면과 측면의 중간) 집합에 속한다. 장애물이 정면에 위치하면 수정가능성이 높고, 장애물이 정면과 측면 중간에 위치하면 수정가능성이 보통이다. Mamdani 형식의 퍼지연산과 무게중심법을 통해 산출한 비퍼지값은 0.558로 산출된다. 동일한 방식으로 장애물이 보행자 정면을 기준으로 45°에 위치하면 수정가능성은 0.130으로 감소한다.

#### 4. 가중치 적용

퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 각 변수의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하며, 여기서 수정가능성 값은 비퍼지값으로 표현된다. 또한 각 변수의 가중치를 적용하여 보행자의 최종 방향 또는 속도 수정가능성을 산정한다. 시간  $t$ 일 때, 보행자  $k$ 의 최종 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  값은 [식 4-3]과 같이 표현된다.

$$A_{k,t} = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot y_k^{*,j} \quad [\text{식 4-3}]$$

여기서,

$y_k^{*,j}$  : 요인  $j$ 의 퍼지추론을 통해 산출된 비퍼지값

$N$  : 요인의 개수

$\omega_j$  : 변수  $j$ 의 가중치

변수  $j$ 의 가중치  $\omega_j$ 는 [식 4-4]와 같이 표현되며, 로짓모형에서 추정된 표준화 계수를 기반으로 한다.

$$w_j = \frac{Z_j}{\sum_i^N |Z_i|} \quad [\text{식 4-4}]$$

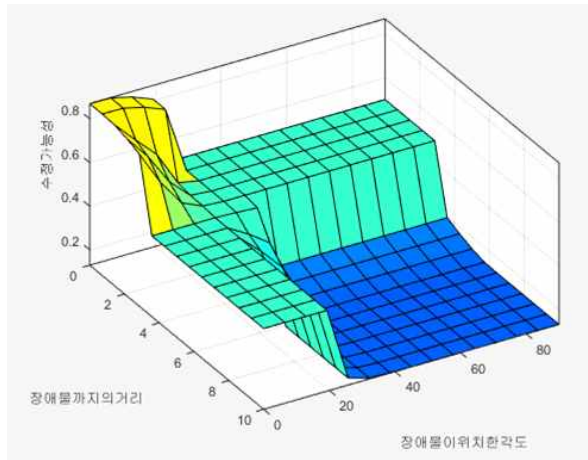
여기서,

$Z_i$  : 변수  $i$ 의 표준화 계수(standardized estimate)

<표 4-25> 변수의 가중치 설정

변수	표준화 계수	변수의 가중치
연령	-0.250	0.122
성별	0.124	0.060
목적	0.085	0.041
거리	0.673	0.327
각도	0.214	0.104
상대속도	0.570	0.277
폭	0.142	0.069

어떠한 설명변수가 방향 또는 속도 수정가능성에 더 많은 영향을 주는 지 살펴보기 위해 유의미한 변수를 대상으로 표준화 계수를 추정하고 변수간 가중치  $w_j$ 를 산정하였다. 중요도를 살펴보면, 장애물과의 거리가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났고, 상대속도, 연령, 장애물이 위치한 각도, 보행공간의 폭, 성별, 보행목적 순으로 중요도가 산출되었다. 다른 조건이 동일한 경우, 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도에 따른 방향 또는 속도 수정가능성  $A_{k,t}$  변화는 <그림 4-10>과 같은 형태를 보인다.



<그림 4-10> 조건부 속성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성

## 제 5 장 모형 구현 및 검증

### 제 1 절 검증방법론

모형의 검증(validation)은 모형이 실제현상을 제대로 설명하고 있는지를 판단하는 과정으로, 본 연구의 검증은 현장조사에서 수집한 자료와 의사결정을 고려한 보행이동행태모형 간의 비교, 분석을 수행한다. 보행행태는 개별특성에 따라 다양하고, 여러 요인이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이를 모형화하는 것 뿐 아니라, 모형에 대한 검증 또한 쉽지 않다. 특히 개별보행자 단위 미시적 행태의 검증은 개인의 특성, 의사결정에 영향을 미치는 요인에 대한 실측자료가 존재하여야 하는데, 이를 수집하기는 현실적으로 불가능하다.

이에 일반적으로 미시적 행태 모형의 검증에는 개별행태가 집계되어 형성되는 거시적 특성이 주로 이용된다. 즉, 개별행태모형을 통해 집계된 거시적 특성이 실제 관측자료와 통계적으로 또는 시각적으로 차이가 크지 않다는 사실로 모형의 설명력을 판단하는 경우가 대다수이다(이종호, 2008).

본 연구에서 개발된 보행이동행태모형의 검증은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 5분 단위로 집계된 거시적 보행교통류 특성을 대상으로 관측자료와 본 모형의 추정결과를 비교한다. 즉, 개별보행자의 의사결정과정을 통해 집계된 거시적 관점의 속도, 밀도, 보행량 특성을 도출하여 검증에 활용하는 것이다. 둘째, 관측자료와 본 모형의 개별보행자 단위의 행태를 비교한다. 개별보행자 행태의 검증은 영향요인에 대한 자료수집이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 개별보행자 단위의 궤적정보를 추출하여 모형과 관측자료간 속도 분포와 이동방향 변화량 분포의 차이를 살펴본다.

<표 5-1> 모형의 검증 대상

구분	내용
거시적 특성 : 5분 단위 집계자료	보행교통류율, 속도, 밀도
미시적 특성 : 개별보행자 궤적	1초 단위 개별보행자의 보행속도, 이동방향 변화량

관측자료와 본 모형의 결과 비교를 위해, 먼저 관측자료는 유동인구 영상촬영자료를 통해 거시적 보행교통류 특성과 개별보행자 단위의 속도, 이동방향 변화량을 추출하였다. 본 모형의 추정결과는 3, 4장에서 개발된 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 시뮬레이션 결과를 이용하여 거시적 특성과 개별행태 특성을 산출하였다.

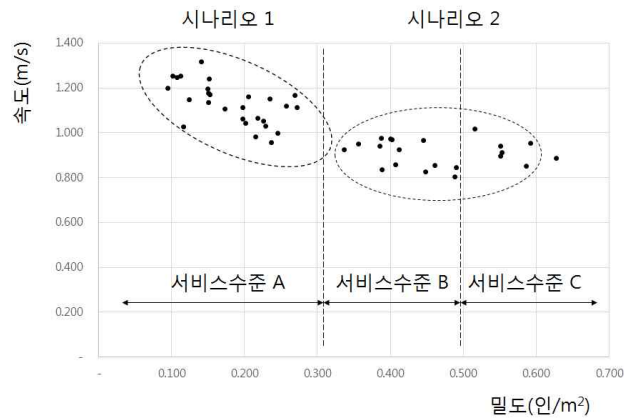
## 1. 분석시나리오

영상촬영자료 중 보행량이 많은 상위 4시간 (12:00~13:00, 16:00~18:00, 19:00~20:00)의 관측자료를 시간단위로 구분하고, 5분 단위 집계자료를 이용하여 서비스수준을 산정하면 <표 5-2>와 같다. 도로용량편람에서 제시하는 보행자도로 서비스수준의 효과척도는 보행교통류율, 점유공간, 밀도, 속도 등을 사용하고 있다. 시간대 12:00~13:00, 14:00~17:00의 경우는 효과척도가 밀도일 경우 서비스수준이 A로 분석되었고, 17:00~18:00, 19:00~20:00 시간대의 서비스수준은 B이하로 산정되었다.

<표 5-2> 5분 단위 관측자료의 보행교통류 특성 및 서비스수준

구분	시간대	보행교통류율(인/분/m)	밀도(인/m <sup>2</sup> )	속도(m/s)
1	12:00~12:59	7.98 (A)	0.13 (A)	1.20 (C)
2	16:00~16:59	12.40 (A)	0.22 (A)	1.10 (D)
3	17:00~17:59	16.89 (A)	0.36 (B)	0.97 (E)
4	19:00~19:55	20.62 (B)	0.51 (C)	0.87 (E)

주: ( )은 해당 효과척도를 기준으로 산출한 서비스수준을 의미한다.



<그림 5-1> 관측자료의 속도-밀도 관계

<그림 5-1>은 관측자료의 속도-밀도 관계를 보여준다. 밀도에 따라 대상지역의 보행교통류는 명확한 경계를 가지고 구분되는 것으로 나타났으며, 보행밀도를 효과척도로 한 보행자도로 서비스수준과 유사한 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 관측자료를 밀도수준에 따라 밀도가 낮은 상황, 밀도가 다소 높은 상황으로 구분하여 <표 5-3>과 같이 시나리오를 설정하고, 시나리오별 관측자료과 모형추정결과 간의 검증을 수행하였다. 시나리오 1은 시간대 12:00~13:00, 16:00~17:00로 밀도가 낮은 보행소통상황이며, 보행밀도를 기준으로 서비스수준이 A이다. 반면, 시나리오 2는 시간대 17:00~18:00, 19:00~20:00이며, 밀도가 다소 높은

상황으로 서비스수준 B이하에 해당한다.

<표 5-3> 분석시나리오 설정

구분	내용
시나리오 1	서비스수준 A이상 밀도가 낮은 보행소통상황
시나리오 2	서비스수준 B이하 밀도가 다소 높은 보행소통상황

## 2. 평가지표

### 1) 거시적 보행교통류 특성

거시적 보행교통류 특성인 속도-밀도-보행교통류율의 검증을 위해, 평가지표는 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE), Theil의 부등계수를 대상으로 하였다. 일반적으로 모형의 평균 예측 오차를 측정하는 지표로 MAE, RMSE가 사용된다. 두 지표는 양(+)의 오차와 음(-)의 오차가 서로 상쇄되는 문제를 피하기 위해 사용되며, RMSE는 상대적으로 개별 오차의 크기가 클 경우, 이를 더 크게 가중시키는 경향이 있다. 각 평가지표는 [식 5-1], [식 5-2]와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad [\text{식 5-1}]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|x_i - \hat{x}_i|) \quad [\text{식 5-2}]$$



여기서,

$x_i$ : 현장조사자료

$\hat{x}_i$ : 시뮬레이션을 통해 도출되는 보행류 특성(속도, 밀도)

$n$ : 전체 자료의 개수

또한 Theil의 부등계수는 예측치가 관측치를 얼마나 잘 설명하는지 나타내는 척도로 [식 5-3]과 같이 표시된다.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i)^2}} \quad [\text{식 5-3}]$$

$U$ 의 분자부분은 RMSE와 동일하지만 이를 스케일링함으로써 부등계수는 항상 0~1사이의 값을 갖는다. 예를 들어  $U$ 값이 0이라면 예측치와 관측치가 완벽히 일치함을 의미하며, 반대로 1인 경우에는 모형이 전혀 예측력을 갖지 않음을 의미한다.

## 2) 미시적 개별행태

궤적자료를 기반으로 한 보행자의 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 대상으로 관측자료와 모형추정 결과를 비교하였다. 분포의 동일성 검정은  $\chi^2$  검정을 활용하였으며, 검정의 가설은 다음과 같이 설정된다.

귀무가설( $H_0$ ): 모형추정값은 관측값을 따르고 있다.

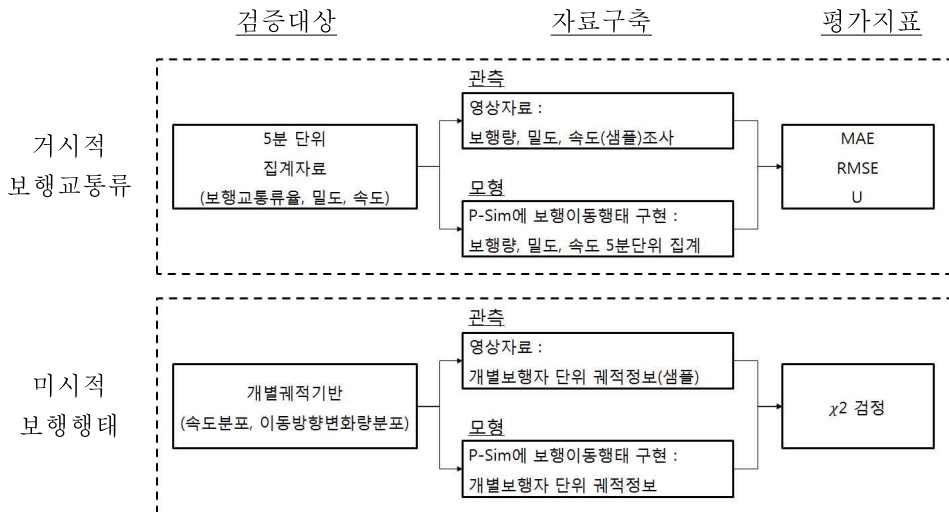
대립가설( $H_1$ ): 모형추정값은 관측값을 따르지 않는다.

$\chi_0^2$  값은 [식 5-4]와 같이 표현되며,  $\chi^2(df, \alpha)$ 는 유의수준  $\alpha$ , 자유도  $df$ 의 임계값으로,  $\chi_0^2 < \chi^2(df, \alpha)$ 이면 귀무가설을 채택하고 모형추정값은 관측값을 따르고 있는 것으로 해석되며,  $\chi_0^2 > \chi^2(df, \alpha)$ 이면 귀무가설을 기각하고 모형추정값은 관측값을 따르지 않는다고 할 수 있다.

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{x_i} \quad [\text{식 5-4}]$$

여기서,  $x_i$ 는 관측값,  $\hat{x}_i$ 는 모형추정값,  $k$ 는 계급의 개수를 나타낸다.

본 연구의 검증방법론은 <그림 5-2>로 요약될 수 있다.



<그림 5-2> 검증방법론

## 제 2 절 자료 구축

### 1. 관측 자료

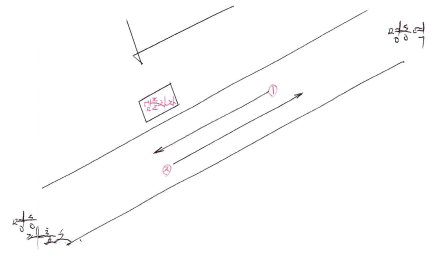
관측자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 서울시 중구 애플라자 앞을 대상지점으로 선정하였다. 유동인구조사는 지점별, 시간대별, 토지유형별 유동인구의 변동특성을 파악하여 보행의 대한 이해도를 높이는 것을 목적으로, 2009년, 2012년, 2013년 3년간 조사되었다(서울특별시, 2014b). 유동인구 영상촬영조사는 주거지역과 상업지역을 주요 대상으로 하며, 토지이용별 보행량이 높은 지점을 위주로 선정하여 강남역, 종각역 등 총 10개 지점을 대상으로 수행하였다(서울특별시, 2013). 본 연구는 명동 애플라자 앞을 대상지역으로 선정하였는데, 해당 지역은 중구 명동 2가 중심상업지역으로 보행량이 많은 지역에 속하며, 차량통행이 제한되어 있어 보행행태 자료를 취득하기 용이하다. 또한 가로수 등 장애물이 없어 영상자료를 통한 보행행태자료(위치, 궤적 등) 추출이 가능하다. 영상촬영자료의 시, 공간적 범위와 자료수집방법은 <표 5-4>와 같다.

<표 5-4> 유동인구 영상촬영조사의 시, 공간적 범위

구분	내용
공간적 범위	서울시 중구 애플라자 앞
시간적 범위	2012년 10월 12일(금) 12:00~20:00
자료수집방법	촬영조사(촬영범위는 횡단거리 14m, 보도폭 9m로 구성)



대상지역 위치



조사개요도



영상자료

<그림 5-3> 영상조사지점도

## 1) 거시적 보행교통류 특성

영상촬영자료 중 보행량이 많은 시간대(12:00~13:00, 16:00~18:00, 19:00~20:00)를 분석대상으로 설정하였다. 보행교통류율과 속도, 밀도 간 상관관계를 살펴보기 위하여 5분 단위의 속도, 밀도, 보행교통류율을 조사하고 검증에 활용하였다. 조사내용은 <표 5-5>와 같다.

<표 5-5> 유동인구 영상자료 조사내용

구분		조사내용
공간	촬영구간 유효보도폭 장애물	횡단거리 14m, 보도폭 9m 12:00~17:00: 9m, 17:00~19:00: 6.9m 17시 이후(6.9m, 수레)
보행량		5분 단위 보행량
보행교통류율		5분 보행량을 1분 단위로 환산하여 보행자가 실제로 보행할 수 있는 유효보도폭으로 나누어 산정
밀도		1분 단위
속도	성별	남: 364명, 여: 411명 (775명 샘플조사)
	출발시각	-
	도착시각	-
	통과시간	평균: 14초
	통행방향	(명동→명동파출소: 453명), (명동파출소→명동: 322명)
개별보행자 궤적		1초 단위 개별보행자의 속도, 이동방향 변화량(샘플조사)

보행교통류율  $V_p$ 은 [식 5-5]와 같이 5분 보행량을 1분 단위로 환산하여 보행자가 실제로 보행할 수 있는 유효보도폭으로 나누어 산정하였다.

$$V_p = \frac{V_5}{5 W_E} \quad \text{[식 5-5]}$$

여기서,

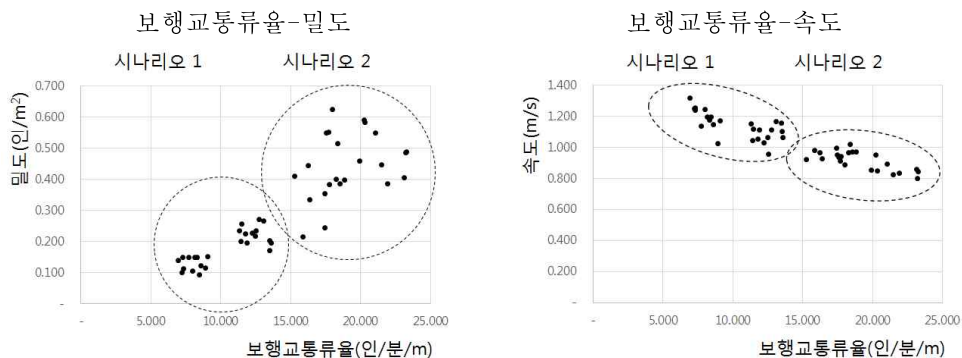
$V_p$  : 보행교통류율(인/분/m)

$V_5$  : 5분 보행교통량

$W_E$  : 유효보도폭(m)

먼저, 관측자료의 거시적 보행교통류 특성을 살펴보면 <표 5-6>과 같

다. 명동 애플라자 앞 보행공간의 보행속도 평균은 1.03m/s로 기존 연구의 평균 보행속도<sup>27)</sup>와는 다소 차이가 있다. 분석대상지가 중심상권지역이고, 조사시간대가 오후시간으로, 이동을 주 목적으로 하기 보다는 쇼핑, 관광 등 비업무 통행이 다수 포함되어 있기 때문으로 보행속도는 다소 낮은 것으로 판단된다. 시나리오별로 구분하면, 평균 보행교통류율이 10.19인/분/m인 시나리오 1의 평균속도는 1.15m/s로 조사되었으며, 표준편차는 0.08m/s이다. 반면 밀도가 높은 시나리오 2의 속도 평균은 0.92m/s로 나타났고 표준편차는 0.06m/s로 시나리오 1에 비해 표준편차는 다소 작다. 밀도의 경우 시나리오 1의 평균은 0.18인/m<sup>2</sup>이며, 시나리오 2는 0.44인/m<sup>2</sup>이다. 분석시나리오별 거시적 보행교통류 특성은 <그림 5-4>와 같다.



<그림 5-4> 시나리오별 거시적 보행교통류 특성

관측자료의 평균 보행속도는 낮지만 정규성 검정 결과, 속도분포는 정규분포를 따르는 것으로 나타났다. Shapiro-Wilk test<sup>28)</sup>결과 P-value가

27) Daamen (2004)에서 기존 연구 검토를 통한 평균 보행속도는 1.34m/s였으며, 국토교통부(2011b)에서 일반 보행통로 평균 보행속도는 1.33m/s로 조사되었다.

28) 정규성 검정을 위한 Shapiro-Wilk test에서 귀무가설( $H_0$ )은 '보행속도가 정규분포를 따른다'이며, 대립가설( $H_1$ )은 '보행속도가 정규분포를 따르지 않

0.160으로 귀무가설( $H_0$ : 보행속도는 정규분포를 이룬다.)을 기각할 수 없으므로, 정규분포를 만족한다고 할 수 있다. 분석시나리오별 보행속도의 정규성을 살펴본 결과, 두 시나리오 모두 보행속도는 정규분포를 따르는 것으로 나타났다(<표 5-7> 참조).

**<표 5-6> 관측자료의 거시적 보행교통류 특성**

구분		표본크기	최소값	최대값	평균	표준편차
시나리오 1	보행교통류율 (인/분/m)	24	6.93	13.58	10.19	2.38
	밀도(인/m <sup>2</sup> )	24	0.10	0.27	0.18	0.06
	속도(m/s)	24	1.03	1.32	1.15	0.08
시나리오 2	보행교통류율 (인/분/m)	24	12.51	23.25	18.75	2.70
	밀도(인/m <sup>2</sup> )	24	0.22	0.63	0.44	0.11
	속도(m/s)	24	0.80	1.02	0.92	0.06
전체	보행교통류율 (인/분/m)	48	6.93	23.25	14.47	5.01
	밀도 (인/m <sup>2</sup> )	48	0.10	0.63	0.31	0.16
	속도 (m/s)	48	0.80	1.32	1.03	0.14

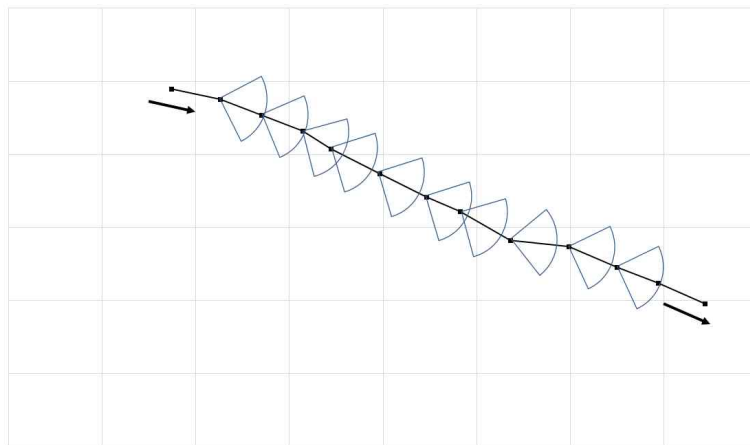
**<표 5-7> 시나리오별 보행속도 분포의 정규성 검정**

구분	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의확률	통계량	자유도	유의확률
시나리오 1	0.101	24	0.200	0.966	24	0.569
시나리오 2	0.140	24	0.200	0.947	24	0.238
전체	0.109	48	0.200	0.965	48	0.160

는다'로 설정된다.

## 2) 개별행태 특성

개별보행자 단위의 미시적 행태에 영향을 미치는 모든 요인을 수집하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 제한적이거나 개별행태의 관측자료를 기반으로 모형과의 비교를 하고자 한다. 이를 위해 Matlab을 활용하여 유동인구 영상촬영자료의 개별보행자 단위 궤적정보를 추출하였다.<sup>29)</sup> 분석시나리오별로 개별보행자 궤적샘플을 추출하고 이상치를 제거한 후, 개별보행자의 1초 단위 속도, 이동방향 변화량을 산출하였다. 개별보행자 단위 궤적은 <그림 5-5>와 같이 추출된다.



<그림 5-5> 개별보행자 궤적

밀도에 따른 시나리오 1과 시나리오 2를 대상으로 영상촬영자료를 분석하여 개별보행궤적 자료를 추출하였다. 시나리오별 각 30명의 궤적을 추출하고, 속도, 이동방향 변화량 자료를 대상으로 이상치를 제거한 개별보행자의 속도, 이동방향 변화량 평균은 <표 5-8>과 같다. 밀도가 낮은 시나리오 1의 경우, 1초 단위 궤적정보를 대상으로 평균 속도는 1.14m/s,

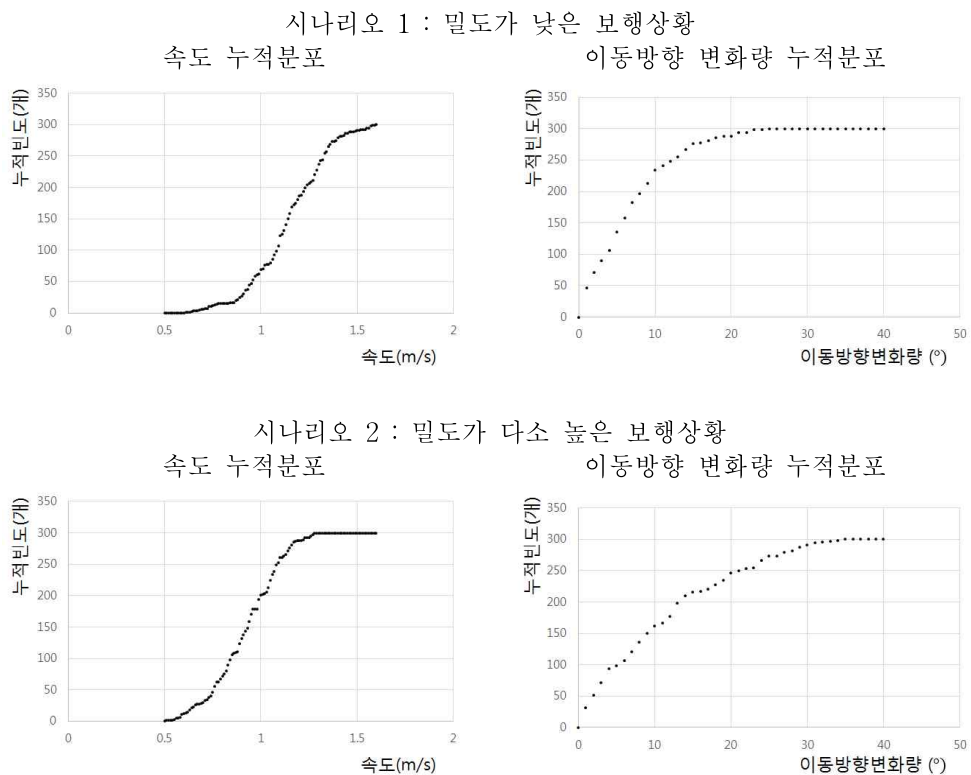
29) 영상에서 이동하는 물체의 궤적 추출은 Matlab의 Motion-Based Multiple Object Tracking을 활용하였다(관련 내용은 본 논문 pp. 90~91을 참조).



이동방향 변화량은  $6.72^{\circ}$ 로 나타났다. 반면 시나리오 2는 평균 속도  $0.92\text{m/s}$ , 이동방향 변화량  $11.03^{\circ}$ 로 밀도가 낮은 시나리오 1에 비해 속도가 낮고 이동방향 변화량은 큰 것으로 조사되었다. 시나리오별 속도와 이동방향 변화량의 누적분포는 <그림 5-6>과 같다.

<표 5-8> 관측자료의 미시적 개별행태 특성

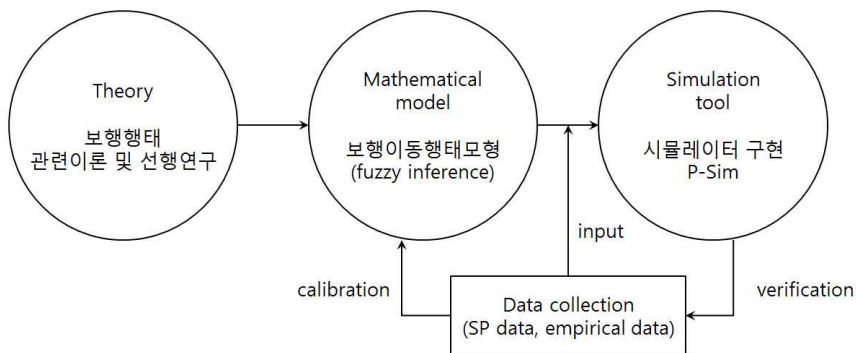
구분	표본크기	평균 속도(m/s)	평균이동방향 변화량( $^{\circ}$ )
시나리오 1	300	1.14	6.72
시나리오 2	300	0.92	11.03



<그림 5-6> 관측자료의 개별행태 특성

## 2. 모형추정 자료

본 모형의 추정결과는 3, 4장에서 개발된 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 시뮬레이터 결과를 활용하여 거시적 보행특성과 개별행태 특성을 산출하였다. 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하는 단계는 <그림 5-7>과 같고, 시뮬레이션의 전반적 단계는 크게 관련이론 및 선행연구 검토(2장), 보행이동행태모형 개발(3장), 모형의 정산(4장), 시뮬레이터 구현(5장)으로 구성된다.



<그림 5-7> 시뮬레이션 단계

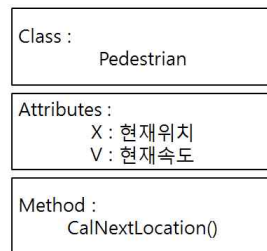
본 연구에서 개발한 보행이동행태모형의 구현에 앞서, P-Sim의 개념 및 주요 모듈을 간략히 살펴보았다. P-Sim은 객체지향 프로그래밍을 기반으로 하며, 보행공간의 미시적 평가가 가능한 보행자 시뮬레이터이다.<sup>30)</sup>

### ① 객체지향 프로그래밍

보행자는 자율성을 가지고 주변 물리적·사회적 환경과의 상호작용을

30) 이용미(2009), 한명주 외(2010), 국토교통부(2011b)를 참조.

통해 의사결정을 수행한다. 따라서 Microsoft의 Visual C++ 이용한 객체지향 프로그래밍을 활용하여 보행이동행태모형을 구현하였다. 객체지향 프로그래밍은 구현하고자 하는 환경의 구성요소들을 동질적인 특징과 기능을 수행하는 각각의 객체로 구분하여 특정한 사건이 발생할 때마다 이에 반응하여 시뮬레이션이 진행되는 방식이다.

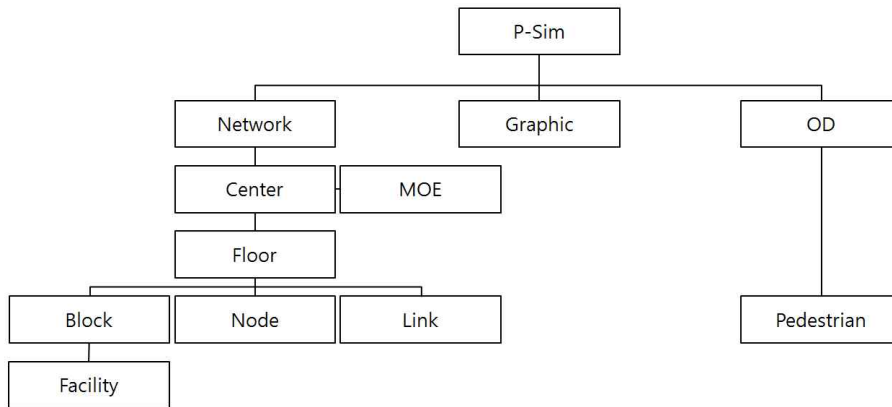


<그림 5-8> P-Sim의 객체지향 프로그래밍 기본 구성요소

객체지향 프로그래밍의 기본 구성요소는 클래스(class), 객체(object), 메서드(method)로 구분되는데, 먼저, 클래스는 같은 종류(또는 문제 해결을 위한)의 집단에 속하는 속성과 행위를 정의한 것이다. 객체지향 프로그램의 기본적인 사용자 정의 데이터형(user define data type)이라고 할 수 있으며, 다른 클래스 또는 외부 요소와 독립적으로 디자인하여야 한다. P-Sim의 클래스는 보행공간의 특성을 분류(네트워크 토폴로지)하는 클래스와 보행자 클래스 등으로 구분된다. 둘째, 객체는 클래스의 인스턴스(실제로 메모리상에 할당된 것)로, 자신 고유의 속성을 가지며 클래스에서 정의한 행위를 수행할 수 있다. P-Sim에서 보행자 클래스의 객체는 보행자를 나타내며, 주어진 환경에서 독자적 의사결정을 수행하여 이동하는 행태를 가진다. 마지막으로 메서드는 클래스로부터 생성된 객체를 사용하는 방법으로써 객체에 명령을 내리는 메시지로, 일종의 함수로 구성되어 있다.

P-Sim에서 정의된 주요 클래스로는 <그림 5-9>와 같이 보행공간 분석을 위한 네트워크(Network), 건물(Center), 층(Floor), 블록(Block), 노

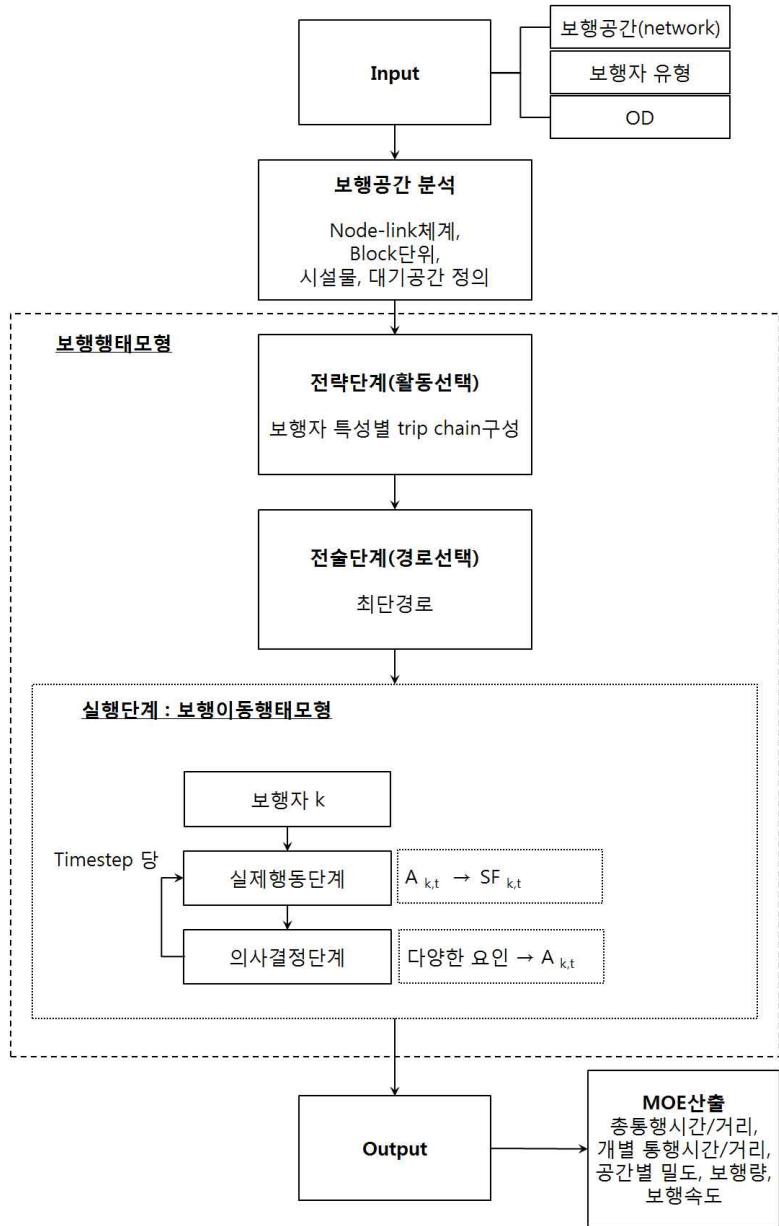
드-링크(Node-link) 클래스 등과 시뮬레이터의 그래픽을 담당하는 그래픽(Graphic) 클래스, 그리고 실제 보행자를 생성, 소멸시키고 관리하는 OD 클래스로 구분된다. 보행자의 의사결정 및 행태를 구현하는 클래스는 보행자(Pedestrian) 클래스로 보행자의 개별특성을 정의하고, 인지, 의사결정, 행동 등의 행태를 메서드로 구성하여 보행이동행태를 구현하였다. 각 클래스는 객체와 객체 간의 관계를 통해 모델링되며, MOE 클래스는 보행자, 시설물 및 시뮬레이터의 총 효과척도를 산출한다.



<그림 5-9> P-Sim의 클래스 위계

## ② P-Sim의 구조

P-Sim은 크게 입력단계, 보행행태 분석을 위한 보행공간 분석단계, 보행행태단계로 구분되며 구조는 <그림 5-10>과 같다. 본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당한다.



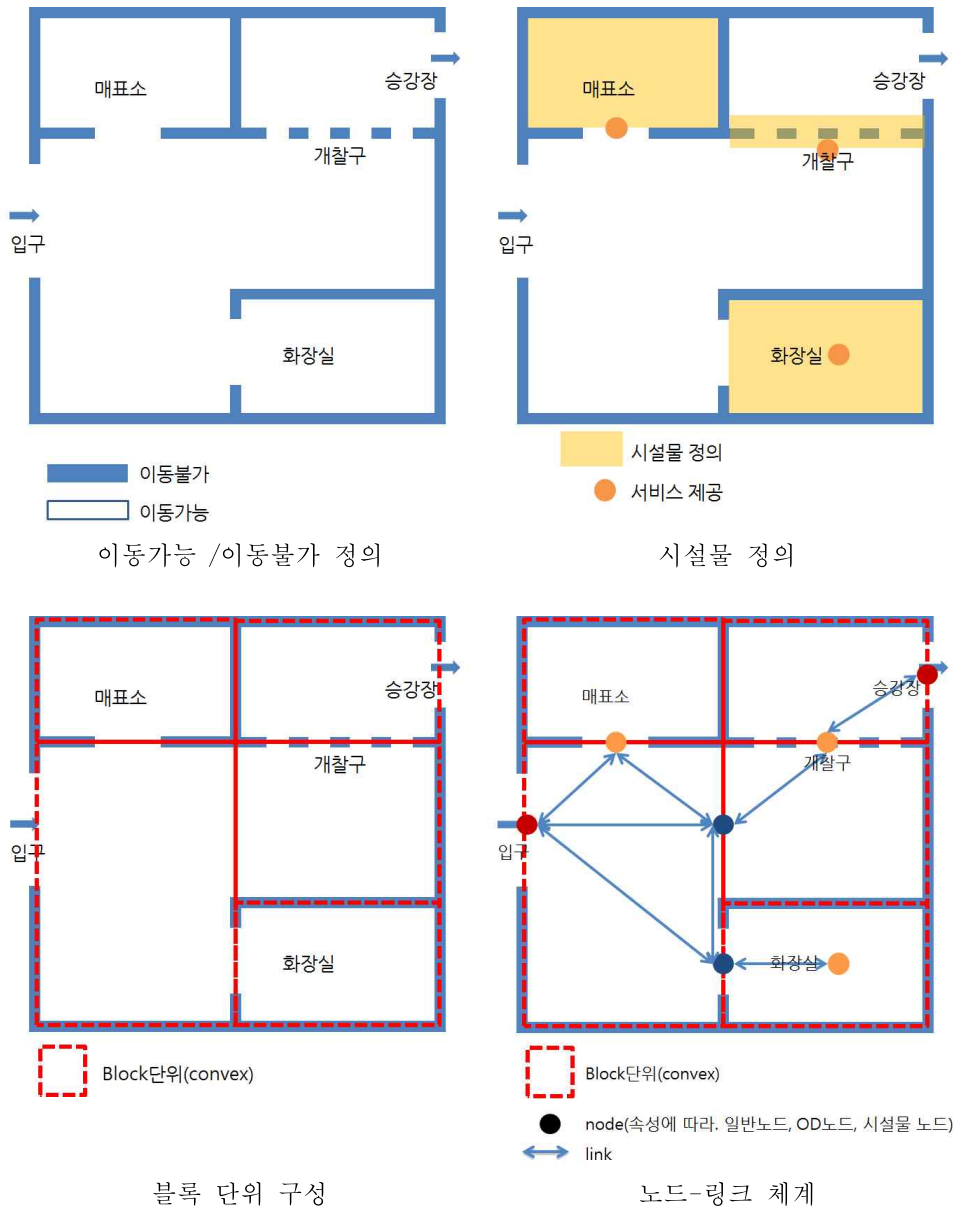
<그림 5-10> 시물레이션 구조도

### ③ P-Sim의 주요 모듈

P-Sim의 주요 모듈은 크게 입력 모듈, 보행공간 정의, 보행행태모형, 출력 모듈로 구분된다. 보행행태모형은 앞서 살펴본 바와 같이 전략, 전술, 실행단계로 분류되며 본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당된다.

먼저 입력 모듈에서는 보행공간과 관련된 속성정보, 보행자 OD, 보행자 유형에 대한 자료를 입력한다. 또한 보행행태를 구현하기 위하여, 보행자 공간에 대한 정의가 필요하다. P-Sim은 CAD 도면을 기반으로 이동가능/불가 구역과 보행공간 내 다양한 시설물을 정의한다. 보행가능한 공간은 convex한 블록 단위로 구분하고, 이를 노드-링크 체계로 구축하여 경로선택이나 활동선택 과정을 구현할 수 있도록 하였다. 보행공간은 크게 보행자 이동공간(보도 및 환승통로 등), 보행활동시설(매표소, 화장실 등), 보행자 생성/소멸시설(출입구, 플랫폼 등)등으로 구분할 수 있다.

전략단계에서 보행자 OD(보행공간의 진입, 출입 지점)는 미리 가정하였으며, 보행공간에서 중간목적지(활동)를 선택하는 과정은 보행목적에 따라, 보행공간의 특성에 따라 다양하게 나타날 수 있다. P-Sim은 보행목적별로 중간목적지 설문조사를 수행하여, 개별특성을 반영한 활동 OD(activity에서 파생된 trip)를 구축하였다. 보행자의 특성(이용시간대, 나이, 성별, 이용수단 등)별 카테고리를 구분하여 확률배분에 의해 활동을 선택할 수 있도록 하였다.



<그림 5-11> P-Sim의 보행공간 정의

전술단계는 경로선택 과정을 대상으로 하며, 보행공간에서 보행자가 경로를 선택하는 데에는 주관적인 판단이 작용하기 때문에 보행자의 통

행목적, 통행특성 등 다양한 측면에서의 연구가 필요하다. P-Sim에서 보행자의 이동경로 선택행태는 최단경로선택을 원칙으로 하며, 최단경로는 크게 최단거리, 공간구문론을 통한 최대인지경로로 설정된다. 경로는 앞서 정의된 노드-링크 체계를 이용하여 산출되며, 보행자는 보행공간에서 최단경로를 선호한다는 기존 연구와 크게 다르지 않다.<sup>31)</sup>

실행단계는 개별보행자를 대상으로 단위시간당 방향 또는 속도를 선택하는 과정으로 미시적 환경조건에서 보행자와의 상호작용을 고려한다. 3, 4장에서 개발된 퍼지추론을 적용한 보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하였다.

또한 P-Sim은 보행자들이 시설물을 이용하는 일련의 과정을 모형화하였다. 먼저, 보행공간내의 시설물들을 대기행태, 서비스행태에 따라 분류하였다. 서비스를 제공하는 시설물의 주요 요소는 대기과 서비스이다. 시설물 이용자에 비해 서비스 창구가 적으면 대기행렬이 발생하게 되고, 대기행렬 내의 사람들은 진입 순서대로 서비스를 받게 된다.

#### ④ 효과척도 산출

시뮬레이션 수행에 따라서 보행자와 시설물은 다양한 정보를 가지게 되며, 해당 정보를 이용하여 분석 기준에 따라 효과척도를 산출한다. 시뮬레이터 효과척도는 보행자 이동행태, 시설물 이용행태, 시뮬레이션 총 효과척도로 구분되며, 보행공간의 적정성, 대안의 효율성 평가 및 분석이 가능하다. P-Sim의 효과척도는 <표 5-9>와 같다.

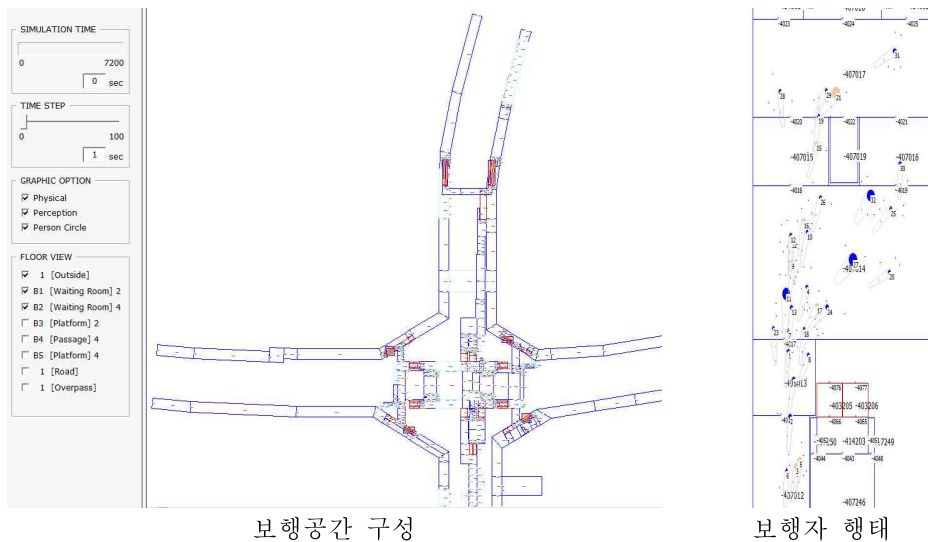
---

31) 본 논문의 pp. 23~25 참조. 일반적으로 보행자의 경로선택 행태에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 이동거리이다(Seneviratne and Morrall, 1985; Borgers and Timmermans, 1986; Bovy and Stern, 1990; Verlander and Heydecker, 1997; 안은희 외, 2004; Li and Tsukagichi, 2005; Gim and Ko, 출간예정).



<표 5-9> P-Sim의 효과척도 산출

구분	보행자	시설물	시뮬레이션 전체
효과 척도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 속도(현재속도, 평균속도)</li> <li>• 이동거리, 이동시간</li> <li>• 상충수 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 서비스시간</li> <li>• 대기시간</li> <li>• 이용인원</li> <li>• 대기인원 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총 시뮬레이션 시간</li> <li>• 총 이동거리, 이동시간</li> <li>• 공간의 보행량, 밀도, 평균속도 등</li> </ul>



<그림 5-12> P-Sim의 실행화면

### ⑤ P-Sim 검증

P-Sim의 검증은 verification<sup>32)</sup>에 해당하며, 일반적으로 시뮬레이터의

32) validation은 사용자 입장에서 소프트웨어가 만족스러운지를 평가하는 과정으로 보행자 시뮬레이터의 경우, 시뮬레이션이 실제현상을 정확히 설명하고 있는 정도를 평가하는 것이 포함된다. 반면, verification은 소프트웨어 개발이 요구사항 명세서와 설계 명세서에 따라 정확하게 구현하였는지, 소프트웨어의 버그가 있는지를 확인하는 과정을 의미한다.

요구사항이 적절하게 구현되었는지를 확인하는 과정을 의미한다. 시뮬레이터의 입력자료와 시뮬레이션을 통해 산출되는 값이 기준에 만족하는지를 확인하는 과정이다.

먼저, P-Sim의 입력자료인 보행자 유형별 속도, 시설물 이용시간 등은 현장조사를 통해 산정된다. 예를 들어, 보행자의 속도분포는 정규분포를 따르는 것으로 나타났으며, 일반보행자의 경우, 평균속도는 1.33m/s이고, 표준편차는 0.2m/s이다. 해당 입력자료를 시뮬레이터에 구축하고 난수를 발생시켜, 시뮬레이션을 구현한 후, <표 5-10>과 같이 요구사항에 만족하는지 확인하였다.

**<표 5-10> P-Sim의 입력자료 확인**

구분		현장조사		본 모형		표본 크기
		분포	평균	분포	평균	
시설물 이용시간 (초)	매표소 이용	Erlang 분포	7.4	Erlang 분포	7.3	70
	화장실이용 (남자기준)	Erlang 분포	2.0	Erlang 분포	2.3	30
	편의시설 이용	정규분포	27.0	정규분포	26.6	80
보행속도(m/s)		정규분포	1.33	정규분포	1.36	100

주: 현장조사결과는 국토교통부(2011b)의 자료를 이용하였다.

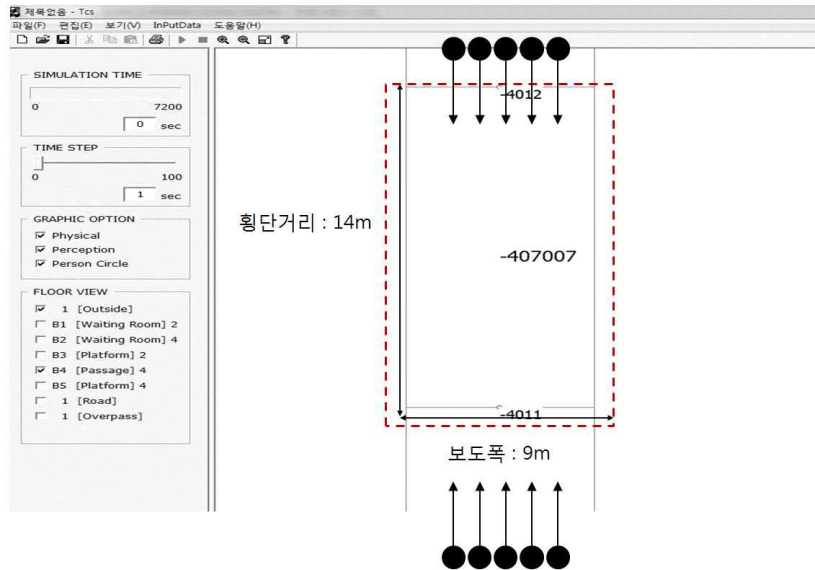
또한 본 연구에서는 여러 영향요인에 대한 개별보행자 단위의 행태를 퍼지추론을 통해 모형화하였으므로, 비퍼지값이 P-Sim에서 정확하게 산출되는지에 대한 확인이 필요하다. P-Sim에서 보행자의 특성, 보행공간의 속성, 사회적 환경 요인 등에 따라 산출되는 수정가능성 값을 확인한 결과, 비퍼지값은 퍼지연산과 비퍼지화 과정을 통해 도출된 값과 동일한 것으로 나타났다.

## ⑥ 시뮬레이션 수행

보행이동행태모형을 P-Sim에 구현하고 관측자료와의 비교를 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 밀도에 따른 분석시나리오에 따라 관측자료와 동일한 조건의 보행 OD를 <표 5-11>과 같이 구축하고 보행공간은 영상촬영자료와 동일하게 구현하였다(<그림 5-13> 참조). 보행 OD는 관측자료의 보행교통류율을 기준으로 시간당 5천명~11천명까지의 조건을 만들어 사용하였으며, 양방향 동일한 보행량을 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

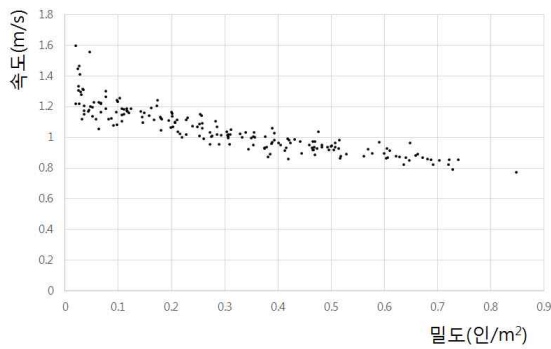
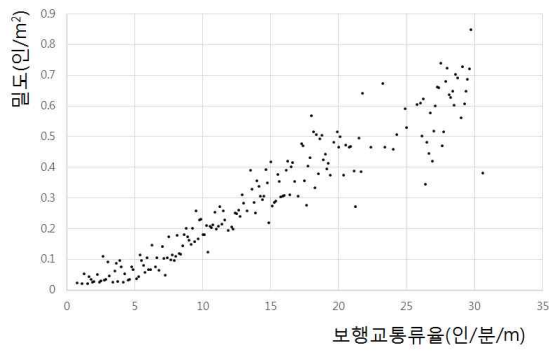
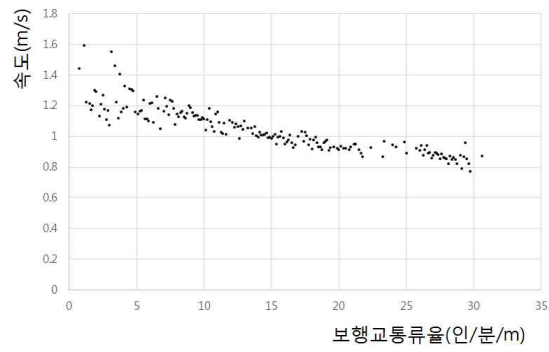
**<표 5-11> 보행 OD 구축**

구분	시간대	전체 보행량(인/시)	방향별 보행량(인/시)
시나리오 1	1	5,000	2,500
	2	7,000	3,500
시나리오 2	3	9,000	4,500
	4	11,000	5,500



<그림 5-13> 시물레이션 네트워크 구성

시물레이션을 수행하여 보행자의 단위시간별 속도, 위치 등 개별행태 특성과 이를 집계한 거시적 관점의 속도, 밀도 특성을 도출하였다. 초기 보행자가 보행공간에 유입된 후, 보행교통류가 안정화 상태에 도달하면, 시물레이션 효과척도를 산출한다. 시물레이션을 통해 도출된 개별행태를 기반으로 보행교통류율, 밀도, 속도 간의 거시적 관계를 시각적으로 살펴 보면 <그림 5-14>와 같다.



<그림 5-14> 모형추정자료의 보행교통류율, 속도, 밀도 관계

## 제 3 절 검증 결과

### 1. 거시적 보행교통류 특성

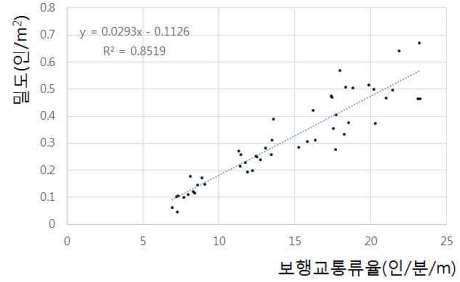
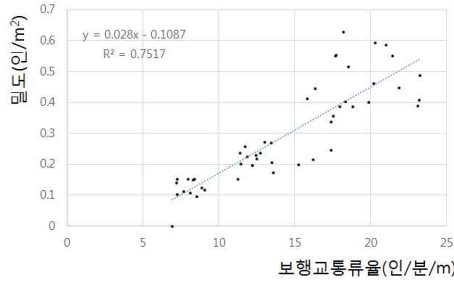
#### 1) 그래프 유사성 비교

거시적 보행교통류 평가지표 비교에 앞서, 관측자료의 속도-밀도-보행교통류를 관계(이하 관측)와 모형을 적용한 시뮬레이터 결과(이하 모형)을 통해 산출된 속도-밀도-보행교통류를 관계는 <그림 5-15>와 같다. 그래프를 이용하여 두 자료의 유사성을 직관적으로 비교하면, 먼저 선형식을 추정한 결과, 대부분 보행특성간의 결정계수( $R^2$ )가 0.6 이상인 것으로 나타나 선형식이 변수간 관계를 어느 정도 설명하고 있다고 판단된다. 관측과 모형 두 그래프가 기존의 거시적 보행교통류 이론과 동일한 패턴을 보이고 있으며, 본 연구에서 개발한 모형의 개별행태가 거시적 보행특성을 적절하게 구현하고 있다고 설명할 수 있다.

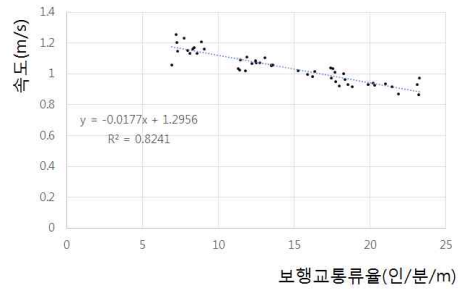
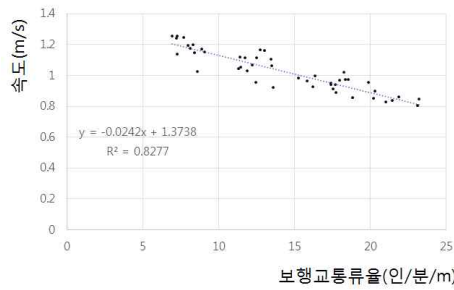
관측

모형

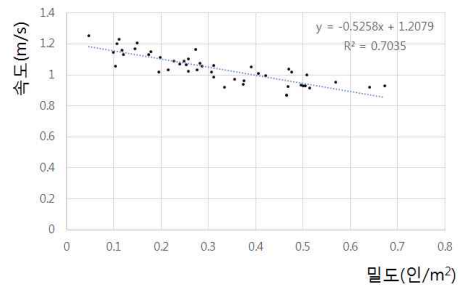
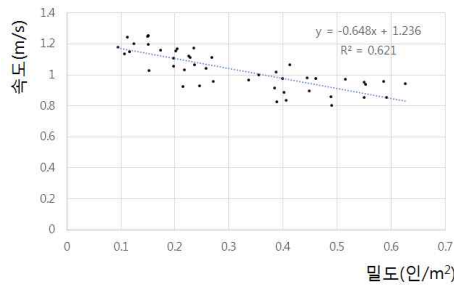
보행교통류율-밀도



보행교통류율-속도



밀도-속도



<그림 5-15> 모형-관측 간 거시적 보행교통류 특성 비교

## 2) 보행교통류율-속도, 보행교통류율-밀도 관계

보행 교통상황을 밀도가 낮은 시나리오 1, 밀도가 높은 시나리오 2로 구분하여 보행교통류율-속도, 보행교통류율-밀도 관계를 P-Sim의 기존 모형과 본 연구의 모형으로 구분하여 검증하였다. 검증결과는 <표 5-12>와 같다.

먼저, 본 모형의 경우, 전체 표본 48개를 대상으로 오차를 살펴본 결과, MAE의 경우 보행교통류율-밀도는 0.069, 보행교통류율-속도는 0.059로 나타났고, RMSE는 각각 0.100, 0.077로 분석되었다. Theil의 부등계수의 경우 밀도 0.269, 속도 0.136로 0에 가까워 관측치와 모형결과가 유사하다고 판단할 수 있다.

서비스수준에 따른 관측과 모형간 오차를 보다 상세하게 검토하기 위하여 시나리오별 평가지표를 살펴보면, 밀도의 경우 시나리오 2에 비해 시나리오 1의 오차가 작아서 모형이 관측값을 더 잘 설명하고 있는 것으로 나타났고, 속도는 시나리오 2의 오차율이 시나리오 1보다 낮아서 관측값에 더 가까운 것으로 분석되었다. 이는 관측자료 속도의 표준편차가 밀도가 높아질수록 줄어들기 때문으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 P-Sim의 기존 모형과 본 모형의 결과를 비교하였다. P-Sim의 보행이동행태는 보행자 시야각( $180^\circ$ )를 기준으로  $30^\circ$ 도 단위의 6개의 지점을 구분하고, 보행자 속도, 성향, 보행밀도에 따라 회피 여부를 결정하는 알고리즘으로 구성되어 있으며, 보행자의 주관성, 불확실성 등에 대한 퍼지개념이 포함되어 있지 않다. 비교결과, 본 모형의 관측과 시뮬레이터 결과간 오차가 P-Sim에 비해 다소 적은 것으로 나타났다. 특히 밀도가 높은 보행교통상황의 시나리오 2는 본 모형이 관측과의 오차가 적어 모형의 설명력이 더 높다고 할 수 있다.



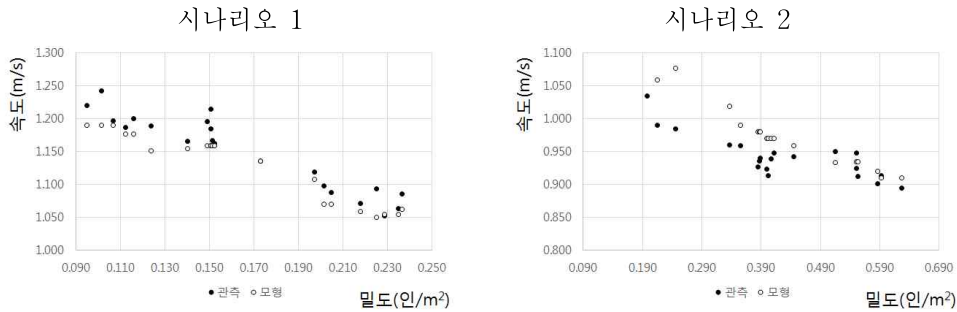
<표 5-12> 모형의 검증결과

구분		밀도			속도		
		본 모형 A	P-Sim B	차이 (A-B)/B×100	본 모형 A	P-Sim B	차이 (A-B)/B×100
전체	MAE	0.069	0.091	-24.2%	0.059	0.121	-51.2%
	RMSE	0.100	0.124	-19.4%	0.077	0.145	-46.9%
	U	0.269	0.314	-14.3%	0.136	0.182	-25.3%
시나리오 1	MAE	0.032	0.044	-27.3%	0.065	0.069	-5.8%
	RMSE	0.047	0.056	-16.1%	0.089	0.095	-6.3%
	U	0.247	0.285	-13.3%	0.140	0.143	-2.1%
시나리오 2	MAE	0.107	0.137	-21.9%	0.054	0.173	-68.8%
	RMSE	0.134	0.166	-19.3%	0.063	0.182	-65.4%
	U	0.272	0.318	-14.5%	0.129	0.212	-39.2%

주: 본 모형은 의사결정과정의 주관성, 불확실성을 고려하기 위한 퍼지추론이 포함된 모형을 의미하며, P-Sim은 퍼지개념이 포함되지 않은 모형이다.

### 3) 속도-밀도 관계

본 연구에서는 동일한 보행교통류율에서 속도, 밀도의 모형과 관측의 오차를 검증과 함께, 거시적 교통류 특성을 잘 설명하는 속도-밀도 관계식을 토대로 관측과 모형 간의 오차를 살펴보았다. 관측과 모형의 속도-밀도 관계는 서로 동일한 기준으로 분류되어 있지 않으므로, KNN(k-nearest neighbor, 최근린 이웃)기법을 활용하여 비슷한 속성을 갖는 군집을 형성하였다. KNN 군집을 통해 시뮬레이터 결과의 속도-밀도 관계를 추정한 후, 관측과 비교하였다. 분석시나리오별 관측자료와 모형결과의 속도-밀도 관계식은 <그림 5-16>이다.

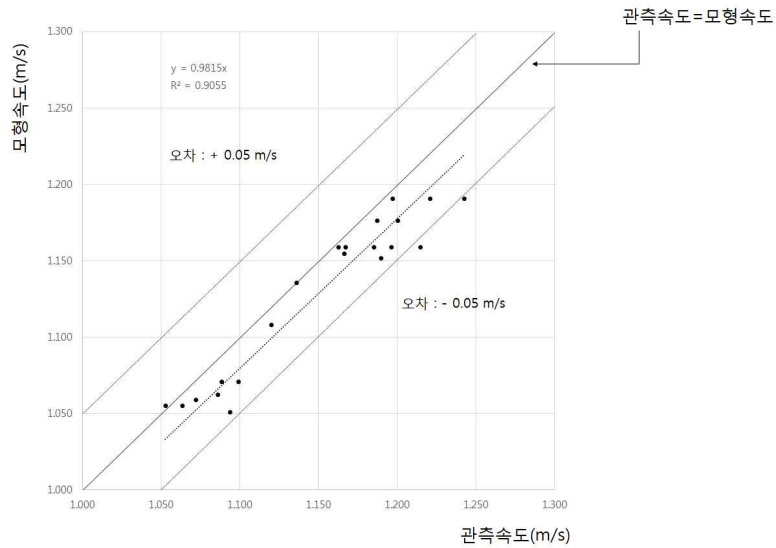


<그림 5-16> 모형과 관측의 속도-밀도 관계

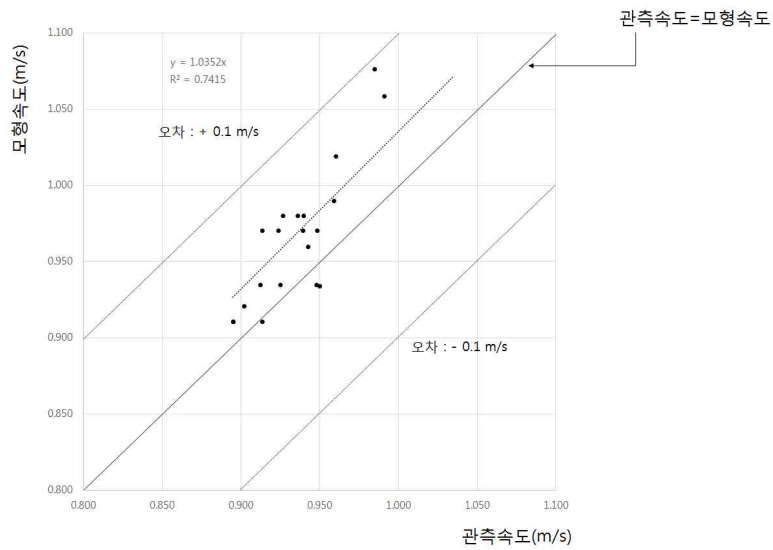
먼저 밀도가 0.3인/m<sup>2</sup> 이하인 시나리오 1에서 보행속도의 관측-모형간 오차는 <그림 5-17>과 같다. 산포도의 추세선 기울기는 0.98이며,  $R^2$ 은 0.91로 기울기가 1(관측속도=모형속도)에 가까운 것으로 나타났으며, 모형의 결과가 관측값을 잘 설명하는 것으로 해석된다. 관측값에 비하여 동일밀도에서 모형의 보행속도는 다소 과소추정되고 있으나,  $\pm 0.05\text{m/s}$  오차범위내에 대부분 포함하는 것으로 보인다.

밀도가 다소 높은 보행소통상황의 시나리오 2 역시 관측자료와 모형자료의 속도는 추세선 기울기가 1.04이고,  $R^2$ 는 0.74로 추정되었다(<그림 5-18> 참조). 시나리오 2는 시나리오 1에 비하여 보행량이 많고 밀도가 높기 때문에 관측-모형간 오차는 시나리오 1에 비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나 오차범위  $\pm 0.1\text{m/s}$ 이내에 포함되어 본 연구의 모형의 추정값이 안정적으로 유지되고 있음을 보여준다.

즉, 속도-밀도 관계식을 토대로 관측자료와 모형결과의 오차를 비교한 결과, 관측자료와 모형결과 간 추세선 기울기는 0.95~1.05사이로 나타났다. 기울기가 1인 경우는 모형과 관측값이 동일한 것을 의미하므로, 본 연구의 모형추정값이 관측값을 적절하게 설명하고 있다고 판단된다.



<그림 5-17> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 1)



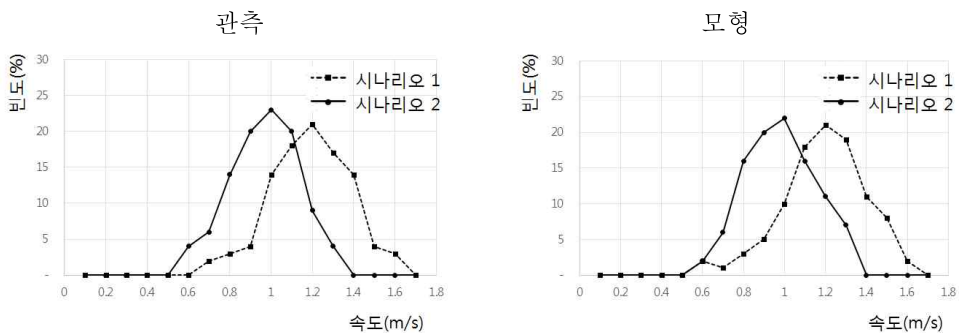
<그림 5-18> 보행속도의 모형-관측 간 오차(시나리오 2)

## 2. 미시적 개별행태

거시적 보행교통류 특성에 대한 검증과 함께 개별보행자 단위 미시적 행태에 대해 관측자료와 모형간 비교를 수행하였다. 개별행태 검증은 퍼지개념이 포함된 본 연구의 모형을 대상으로 한다.

### 1) 속도 분포

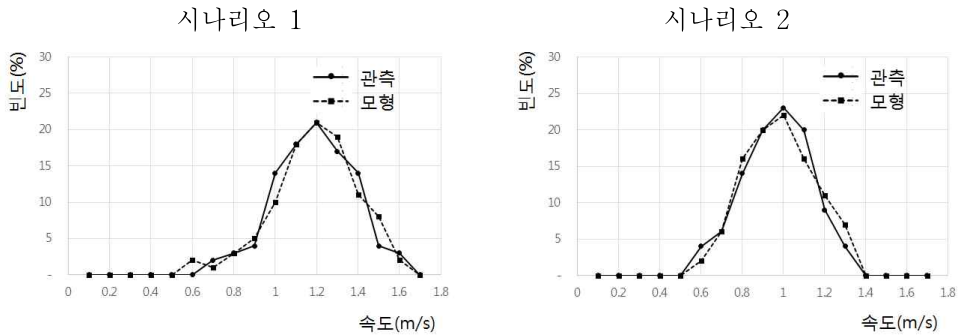
관측자료와 모형추정결과의 속도 분포 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 비교하였다. 여기서 귀무가설은 두 집단간 속도 분포는 차이가 없다는 것이다. 먼저 관측자료와 모형결과의 시나리오별 속도분포는 <그림 5-19>와 같다. 모형추정결과와 관측자료 모두 밀도가 다소 높은 시나리오 2의 속도가 시나리오 1에 비해 낮은 것으로 나타났다.



<그림 5-19> 시나리오별 속도 분포 차이

속도 분포의 동일성 검정 결과는 <표 5-13>과 같다. 먼저 밀도가 낮은 시나리오 1을 대상으로 관측과 모형간 속도 분포의 동일성 검정을 수행하면  $\chi_0^2$  값이 7.10로 나타나, 이는 유의수준 0.05 일 때 임계값 16.92 보다 작은 것으로 나타났다. 즉, 귀무가설을 기각할 수 없고, 모형을 통

해 산출된 속도 분포와 현장조사 개별계적자료의 속도 분포는 동일하다고 할 수 있다. 밀도가 다소 높은 시나리오 2 역시  $\chi_0^2$ 이 4.82로, 임계값 14.07보다 작아서 관측과 모형간 속도 분포는 동일하다.



<그림 5-20> 모형과 관측 간 속도 분포 비교

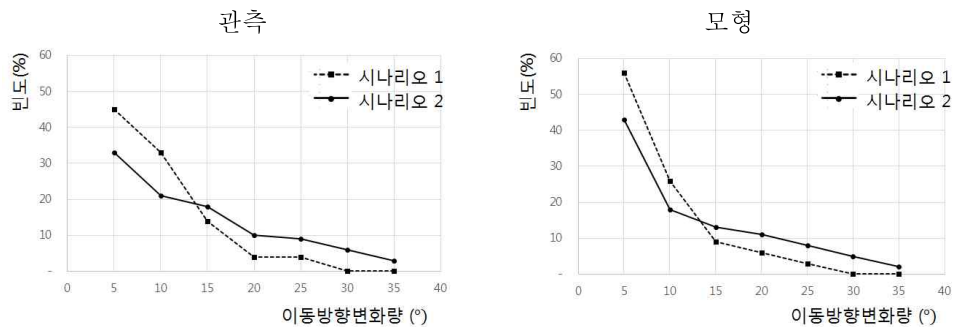
<표 5-13> 모형과 관측 간 속도 분포 동일성 검정

구분	$df$	$\chi_0^2$	$\chi^2(df, 0.05)$	유의확률
시나리오 1 밀도가 낮은 보행상황	9	7.10	16.92	0.63
시나리오 2 밀도가 다소 높은 보행상황	7	4.82	14.07	0.68

## 2) 이동방향 변화량 분포

속도 분포와 동일하게 개별계적정보를 통해 모형과 관측의 이동방향 변화량 분포를 비교하였다. 이동방향 변화량은 1초 단위의 개별보행자 진행방향 차이를 의미하며 변화량 계급은 5°단위로 구분하였다. 관측자료와 모형추정결과의 시나리오별 이동방향 변화량 분포는 <그림 5-21>과 같다. 밀도가 다소 높은 시나리오 2의 이동방향 변화량이 시나리오 1

에 비해 관측자료와 모형결과 모두 큰 것으로 나타났다. 이는 보행공간 내의 보행자가 많아질수록 주변 보행자와의 상호작용이 증가하여 보행자는 이동방향을 변경하고자 하는 가능성이 높아지기 때문으로 판단된다. 반면, 용량에 도달하거나 초과할 정도의 보행량은 개인의 이동방향 변경에 제한을 주기도 한다.

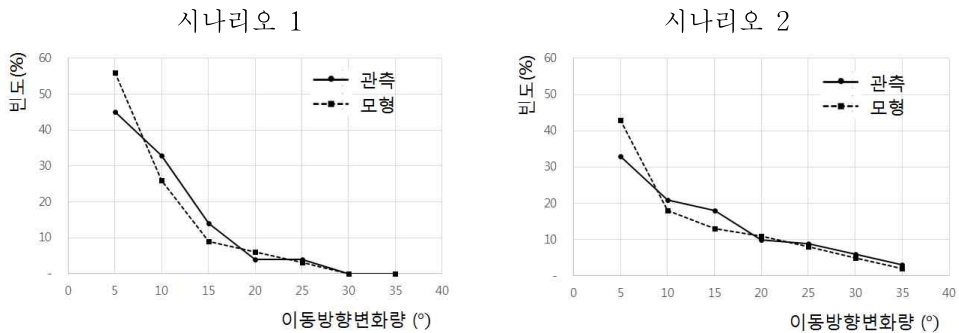


<그림 5-21> 시나리오별 이동방향 변화량 분포 차이

이동방향 변화량 분포의 적합성 여부를  $\chi^2$  검정을 통해 살펴본 결과는 <표 5-14>와 같다. 시나리오 1의  $\chi_0^2$ 이 7.21로, 임계값 9.49보다 작아서 모형과 관측의 이동방향 변화량 분포는 같다고 할 수 있다. 밀도가 높은 시나리오 2의  $\chi_0^2$ 이 5.56이며, P값이 0.47로 귀무가설을 기각하지 못한다. 즉, 관측자료와 모형결과 간 이동방향 변화량 분포는 동일한 것으로 분석되었다.

<표 5-14> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 검정

구분	$df$	$\chi_0^2$	$\chi^2(df, 0.05)$	유의확률
시나리오 1 밀도가 낮은 보행상황	4	7.21	9.49	0.13
시나리오 2 밀도가 다소 높은 보행상황	6	5.56	12.59	0.47



<그림 5-22> 모형과 관측 간 이동방향 변화량 분포 비교

본 연구에서는 제한적이거나 개별행태 자료를 추출하여 모형의 검증을 수행하였다. 일반적으로 개별행태에 영향을 미치는 요인은 다양하며, 자료 수집의 한계로 모든 개별행태를 검증하는 것은 어렵다. 개별체적을 통해 추출한 개별보행자의 속도 분포와 이동방향 변화량 분포를 대상으로 관측자료와 모형결과 간 동일성 검정을 실시한 결과, 속도 분포, 이동방향 변화량 분포는 두 집단간 차이가 없는 것으로 나타났다.

## 제 6 장 결론

### 제 1 절 연구결과의 요약 및 시사점

보행이 활성화되고 보행공간에 대한 계획 및 운영이 중요하게 인식됨에 따라, 보행행태를 반영한 보행공간 평가 틀에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 보행행태의 기초가 되는 개별보행자 단위의 의사결정과정이 반영된 보행이동행태모형을 개발하였다. 이를 보행자 시뮬레이터(P-Sim)에 구현하고 현장조사자료와 비교, 분석을 통해 모형의 신뢰성을 검증하였다. P-Sim은 전략, 전술, 실행의 전 단계에 걸쳐 보행행태 평가가 가능하여, 보행공간의 분석에 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구의 보행이동행태모형은 실행단계에 해당하고, 개별보행자 단위의 방향 또는 속도 선택 행태를 다루고 있다. 실행단계는 계층적 의사결정구조 중 하위단계로 보행행태모형의 기초가 된다.

본 연구의 보행이동행태모형은 크게 5가지 특성을 가지고 있다. 첫째, 개별보행자 단위의 미시적 행태를 구현하며, 둘째, 본 모형의 보행자는 스스로 의사결정을 수행하는 지적 행위자이다. 셋째, 보행이동행태는 의사결정과정이며, 개인의 주관성, 불확실성, 애매함 등 특성을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 퍼지추론 접근방식을 활용하였다. 넷째, 보행이동행태의 영향범위는 인간의 시각을 기준으로 설정된다. 마지막 특성으로 보행이동행태는 의사결정단계와 실제행동단계 2가지로 구분된다. 의사결정단계는 환경적 요인, 개별특성에 따른 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성을 도출하는 과정이며, 이때 수정가능성은 IF-THEN 규칙, 소속도 함수, 퍼지연산, 비퍼지화 과정을 통해 산정된다. 실제행동단계는 의사결정단계의 수정가능성을 고려하여 실제 이동을 구현하는 과정으로, 본 연구에서는 널리 활용되고 있는 Social Force Model를 이용하였다.

보다 정교하고 객관적인 보행이동행태모형을 위해, 본 연구에서는 설



문조사에 근거하여 보행이동행태 의사결정요인을 살펴보았다. 이항로짓 모형을 이용하였으며, 보행행태에 영향을 미치는 요인으로 성별, 연령, 통행목적 등 개별특성과 장애물과의 거리, 장애물이 위치한 각도, 상대속도 등 사회적 환경 요인, 보행공간의 폭 등 물리적 환경 요인이 선정되었다. 또한 남성이 여성보다, 연령이 적을수록, 업무통행일수록 또한 장애물과의 거리가 가까울수록, 장애물이 의사결정주체의 정면에 위치할수록, 다가오는 사람일수록 보행자의 방향 또는 속도 수정가능성은 높아지는 것으로 분석되었다. 통계적으로 유의미한 변수를 퍼지추론의 영향요인을 선정하고, 설명변수와 종속변수간 관계를 통해 IF-THEN 규칙을 생성하였다. 또한 실제 보행행태조사를 통해 장애물을 회피하는 행태를 분석하고 퍼지추론의 소속도 함수를 생성하여, 보다 현실적인 모형을 구축하고자 하였다.

마지막으로, 개발된 모형을 P-Sim에 구현하고 현장조사자료와의 비교를 통해 검증 및 평가를 수행하였다. 현장조사자료는 2012년 서울시 유동인구 영상촬영자료를 활용하였으며, 대상지역은 명동 상업지역으로 보행량이 많고 차량통행이 제한되어 있어서 보행행태를 수집하기 용이하다. 모형의 검증은 크게 개별자료가 집계된 거시적 보행교통류 특성비교와 개별보행자 단위의 행태비교로 구성된다. 거시적 보행교통류 특성인 속도, 밀도, 보행교통량을 대상으로 모형과 관측자료를 비교하고, 이때 평가지표는 RMSE, MAE, Theil의 부등계수를 사용하였다. 개별행태 검증은 보행자 궤적을 토대로 속도 분포, 이동방향 변화량 분포를 산정하고, 모형과 관측 분포의 동일성을  $\chi^2$  검정을 통해 살펴보았다. 분석결과, 개별보행자 단위의 의사결정과정을 고려한 본 모형이 거시적 보행교통류 특성을 설명하는 것으로 판명되었고, 개별행태 역시 관측과 동일한 분포를 보이는 것으로 조사되었다.

교통분야에서 차량교통에 비해 보행교통과 관련된 연구는 상대적으로 소외되어 온 것이 사실이다. 보행은 인간이 선택할 수 있는 가장 기본적인 교통수단으로써 모든 통행의 시작과 끝을 담당하는 중요한 수단이다. 또한 보행은 교통수단뿐 아니라, 개인, 지역, 국가 차원 등 다양한 측면

에서 편익을 창출하는 기능을 수행한다. 먼저 개인적 측면에서 보행은 인간의 건강을 증진시키는 역할을 한다. 지역적 차원에서는 지역주민과의 교류를 활발하게 하며, 지역내 보행활성화를 통해 경제적 편익이 발생하기도 한다. 또한 보행은 지속가능한 비동력 교통수단으로써 국가적 차원에서 사회적 비용을 감소시킨다.

최근 보행의 중요성에 많은 사람들이 공감하고 있고, 이러한 변화와 함께 본 연구에서는 보행행태와 보행공간 분석에 대한 연구를 분류하고 선행연구를 검토하였다. 보행행태를 반영한 보행공간 평가 틀에 대한 요구가 증가하고 있으며, 기존 거시적 모형으로는 세밀한 운영방안, 시설설치에 대한 분석이 어려운 한계가 있다. 본 모형은 개별보행자 단위의 행태를 반영하고 인간의 사고에 기반을 둬으로써 기존 모형의 한계를 극복한 점에 있어서 의미가 있다. 이를 기반으로 보행공간의 계획 및 운영단계에서 다양하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 단순히 보행공간의 용량분석에 제한되지 않고, 새로운 보행시설 또는 보행정책의 도입 시 다양하고 미세한 보행공간 변화를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 2 절 한계 및 향후 연구 과제

본 연구의 한계점과 향후 연구는 크게 4가지로 제시하였다.

첫째, 개별보행자 단위의 미시적 보행행태는 보행자의 특성, 주변 상황 등 다양한 요인이 복합적으로 영향을 미치고 잠재요인이 상당수 포함되어 있기 때문에 이를 모형에 반영하는데 제한이 있다. 본 연구에서는 보행자의 이동행태에 영향을 미치는 일부 요인을 대상으로 모형을 개발하였다. 분석결과, 통행빈도, 보행공간의 밀도, 경사유무 등의 요인이 통계적 유의성을 갖지 못하는 것으로 나타나서 본 모형에서는 제외되었다. 향후 다양한 요인이 추가로 고려된다면 보행이동행태모형의 신뢰성은 높

아질 것으로 판단된다.

둘째, 본 연구의 보행행태는 실행단계의 보행이동행태를 대상으로 한다. 전략, 전술단계에 해당하는 보행자의 목적지, 보행공간내의 활동, 경로는 미리 정해진 것으로 간주하고 미시적 상호작용을 고려한 이동행태에 집중하여 모형을 개발하였다. 실제 보행공간에서 보행행태는 전략, 전술, 실행단계의 계층적 의사결정구조로, 각 단계는 상호연관성을 가지고 있다. 따라서 보행자의 목적지 및 활동선택, 경로선택행태와 미시적 보행이동행태가 상호연관성을 갖는 모형개발이 필요하다. 즉, 전략, 전술, 실행단계가 통합된 보행행태모형이 구현되어야 할 것이다.

셋째, 개별보행자 단위의 미시적 보행행태는 다양한 상황에 대한 자료 수집의 한계로 검증이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이에 일반적으로 개별행태가 집계되어 형성되는 거시적 특성이 검증에 주로 활용된다. 본 연구에서 개별보행자 궤적 정보를 이용하여 속도, 이동방향 특성에 대한 개별행태 검증을 수행하였으나, 전체 보행자가 아닌 일부를 대상으로 하였다는 한계를 가지고 있다.

넷째, 본 연구는 유동인구 영상촬영자료와 모형 간 비교를 통해 검증을 수행하였다. 영상촬영자료는 명동 상업지역의 보행전용도로를 대상으로 하며, 보행행태를 수집하고 분석하기에 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 분석대상지역의 평균 보행속도는 기존 연구에 비해 다소 낮고 밀도를 효과적으로 설정할 경우 서비스수준이 C이상으로 비교적 혼잡하지 않은 보행상황을 보이고 있다. 본 연구는 밀도가 낮은 상황을 대상으로 검증을 수행하였다는 한계를 가지고 있으며, 환승센터, 복합상업시설 등 여러 보행공간 계획 및 운영에 본 모형을 활용하기 위해서는 혼잡 등 다양한 보행상황에 대한 검증이 추가로 요구된다. 또한 화재, 재난 등 긴급상황 시 보행행태는 일반보행행태와 차이가 나므로 향후 이에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 곽수영·남현우·전철민, 2012. 건물내 전체 인원분포를 고려한 실내 보행자 최적 대피모형. 한국지형공간정보학회지, 20(2): 23~29.
- 국가기술표준원, 2004. 제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서.
- 국토교통부, 2011a. 제1차 비동력·무탄소 교통수단 활성화 종합계획(2012~2016).
- 국토교통부, 2011b. 교통연계 및 환승시스템 기술개발 최종보고서.
- 국토교통부, 2013. 도로용량편람.
- 김강수·조혜진, 2006. SP 조사설계 및 분석방법론. 보성각.
- 김건영·김형철·오승훈, 2002. 주거지역 이면도로의 보행행태특성 분석. 대한토목학회지, 22(2-D): 197~205.
- 김기현·손동욱·이동훈, 2014. 상업가로의 물리적 특성과 보행밀도와의 연관성 분석. 한국도시설계학회지, 15(5): 161~171.
- 김영옥, 2003. Space Syntax를 활용한 공간구조속성과 공간사용패턴의 상호관련성 연구. 국토계획, 38(4): 7~17.
- 김영옥·신행우, 2004. 서울 북촌의 공간구조 분석을 위한 방법론 연구. 대한건축학회논문집, 20(9): 201~209.
- 김영옥·신행우, 2007. 토지이용에 따른 보행특성에 관한 연구: Space Syntax를 활용한 보행네트워크 분석과 보행량의 상호관련성을 중심으로. 한국도시설계학회지, 8(3): 83~94.
- 김장욱·남궁문·김정현·이수범, 2006. 퍼지 및 신경망 이론을 이용한 교통사고예측모형 개발에 관한 연구. 대한교통학회지, 24(7): 81~90.
- 김정현·오영태·손영태·박우신, 2002. 보행자 시설 서비스수준 산정에 관한 연구. 대한교통학회지, 20(1): 149~156.
- 김찬주·김영옥, 2007. 지하철 역사공간에서 승객의 유동 패턴에 관한 연구. 대한건축학회논문집, 23(11): 71~78.

- 김태호·이기영·박제진, 2009. 보행자의 인식서비스수준에 대한 요인분석. 서울도시연구, 10(2): 161~173.
- 남궁문·성수련·김경태·서승환, 1995. 퍼지추론을 이용한 도로경로선택 모델화 수법. 한국 퍼지 및 지능시스템학회지, 5(3): 92~100.
- 도로교통안전협회, 1982. 보행속도 조사연구보고서.
- 문태헌·성한욱, 2006. 보행환경 개선을 위한 보행자 에이전트(Agent) 모형의 개발과 시뮬레이션. 국토계획, 41(6): 79~92.
- 박희제·배상훈·정희진, 2008. 인간공학적 요소를 반영한 첨단차량 추종모형. 대한교통학회지, 26(2): 121~133.
- 서울특별시, 2013. 서울 유동인구조사보고서.
- 서울특별시, 2014a. 서울특별시 도시교통정비 기본계획.
- 서울특별시, 2014b. 서울 유동인구조사보고서.
- 성기범·한명주·이영인·노문섭, 2011. 실험조사를 통한 보행자의 장애물 회피행태 분석. 교통연구, 18(2): 61~75.
- 손영태·박우신·김상구·김태완·김영호, 2004. CA기반 보행교통류 Simulation 모형 개발. 대한토목학회지, 24(4-D): 563~568.
- 안은희·강석진·이경훈, 2004. 대규모 지하 상업공간에서의 보행자의 움직임과 경로선택 특성에 관한 연구. 대한건축학회논문집, 20(9): 21~28.
- 오성훈·남궁지희, 2011. 보행도시: 좋은 보행환경의 12가지 조건. 건축도시공간연구소.
- 오성훈·이소민, 2013. 보행환경과 행태: 조사분석 보고서(1). 건축도시공간연구소.
- 윤상원·배상훈, 2007. 대중교통 수단선택과 연계한 복합환승센터 내 보행자 최적경로 산정. 한국ITS학회논문지, 6(2): 56~56.
- 윤성환·이정재·이민정, 2009. buildingEXODUS를 활용한 행위기반 피난시뮬레이터의 신체 및 심리적 변수에 대한 민감도 분석. 대한건축학회논문집, 25(9): 347~355.
- 이상훈·김성환, 2003. 퍼지 비가법 제어를 이용한 도시 교통망의 경로 탐

- 색. 대한교통학회지, 21(1): 103~113.
- 이상훈·김덕영·김성환, 2002. 퍼지평가방법을 이용한 교통노선 결정. 대한교통학회지, 20(1): 65~76.
- 이승재, 2013. 행위자 기반 시뮬레이션 모형을 이용한 시각-보행 통합 분석. 고려대학교 박사학위 논문.
- 이신해, 2012. 서울시 보도의 보행 LOS 진단 및 분석방법 개선에 관한 연구. 대한교통학회지, 30(3): 7~15.
- 이신해·이승재, 2009. 행위자 기반(agent-based) 보행 시뮬레이션 모형을 이용한 보행시설 설치 실험에 관한 연구. 한국ITS학회논문지, 8(3): 131~138.
- 이용미, 2009. 보행자 행태분석 알고리즘을 적용한 환승센터 시뮬레이터 프로토타입 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
- 이인성·김현옥, 1998. 도시주거지 보행경로 선택행태에 관한 연구: GIS를 이용한 보행환경 만족도의 분석. 국토계획, 33(5): 117~129.
- 이종호, 2003. 교통시스템분석시 에이전트기반모형기법의 적용. 대한교통학회지, 21(1): 147~156.
- 이종호, 2008. 미시적 보행시뮬레이션모형의 연구동향. 교통기술과정책, 5(4): 23~33.
- 이준, 2012. 보행교통류에서의 PSO를 고려한 회전육각격자모형 개발. 교통연구, 19(3): 35~45.
- 이준, 2013. 일반 보행자와 피난자의 보행행태 특성에 관한 기초연구. 교통연구, 20(1): 43~54.
- 이준·허민국·정진혁, 2009. 보행교통류를 위한 회전육각격자모형 개발. 대한교통학회지, 27(1): 169~177.
- 이희연·노승철, 2012. 고급통계분석론: 이론과 실습. 문우사.
- 임은선, 2008. 알기 쉬운 연구방법론: 퍼지이론. 국토, 322: 110~119.
- 임진경·신혜숙·김형철, 2004. 유형별 보행자도로의 서비스수준 평가기준 설정. 대한토목학회지, 24(5-D): 723~728.
- 정영근·박창호, 2005. 퍼지 추론을 이용한 최단 경로 탐색 알고리즘의 개

- 발. 대한교통학회지, 23(8): 171~179.
- 정혜선·김영옥, 2012. 지상·지하공간의 수직연계유형 설정 및 보행네트워크 분석. 대한건축학회논문집, 28(9): 3~11.
- 채석·오영석, 1995. 퍼지이론과 제어. 청문각.
- 채승병·조항현·문희태, 2007. 행위자 기반 모형과 그 응용. 물리학과 첨단기술, 16(10): 10~14.
- 최성택·이향숙·추상호·김수재, 2015. Social path를 반영한 보행 접근성 평가에 관한 연구. 대한교통학회지, 33(1): 50~60.
- 하슬·조윤옥·구남국·박광필·이규열·노명일, 2013. 보행 방향 포텐셜 함수 기반의 탈출 경로 결정 알고리즘을 이용한 여객선 승객 탈출 시뮬레이션. 대한조선학회논문집, 50(5): 307~313.
- 한명주·최동훈·정기찬·이영인, 2010. 미시적 보행자 시뮬레이터(P-Sim: Pedestrian-Simulator)의 기본구조 및 개발개요. 교통기술과정책, 7(2): 15~29.
- 한명주, 2015. 보행자 행태를 반영한 보행공간 분석 프로그램. 철도저널, 18(3): 103~108.
- 한상진·김영옥·오순미, 2008. 연결도를 이용한 보행네트워크와 보행통행량의 상호관련성 연구. 대한교통학회지, 26(1): 137~144.
- Antonini, G., M. Bierlaire and M. Weber, 2006. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. Transportation Research Part B, 40(8): 667~687.
- Armstrong, R. L., 1987. The midpoint on a five-point Likert-type Scale. Perceptual and Motor Skills, 64(2): 359~362.
- Asano, M., T. Iryo and M. Kuwahara, 2009. A pedestrian model considering anticipatory behaviour for capacity evaluation. Transportation and Traffic Theory, 2009: 559~581.
- Asano, M., T. Iryo and M. Kuwahara, 2010. Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour. Transportation Research Part C, 18(6): 842~

855.

- Batty, M. and B. Jiang, 1999. Multi-agent simulation: New approaches to exploring space-time dynamics with in GIS. Centre for Advanced Spatial Analysis, Working Paper Series, Paper 10, University College London.
- Blue, V. J. and J. L. Adler, 1998. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro simulation. *Transportation Research Record*, 1644: 29~36.
- Blue, V. J. and J. L. Adler, 2001. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B*, 35(3): 293~312.
- Boarnet, M. and R. Crane, 2001. *Travel by design: the influence of urban form on travel*. Oxford University Press.
- Borgers, A. and H. Timmermans, 1986. A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. *Geographical Analysis*, 18(2): 115~128.
- Bovy, P. H. L. and E. Stern, 1990. Route choice: Wayfinding in transport networks. *Studies in Operational Regional Science*, 9: 1~14.
- Bowman, B. L. and R. L. Vecellio, 1994. Pedestrian walking speeds and conflicts at urban median locations. *Transportation Research Record*, 1438: 67~73.
- Burstedde, C., K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz, 2001. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295(3~4): 507~525.
- Cheung, C. Y. and W. H. K. Lam, 1998. Pedestrian route choices between escalators and stairways in metro stations. *Journal of Transportation Engineering*, 124(3): 277~285.
- Daamen, W., 2004. *Modelling passenger flows in public transport*



- facilities. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Daamen, W. and S. P. Hoogendoorn, 2003. Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Record*, 1828: 20~30.
- Daamen, W., S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy, 2005. First-order pedestrian traffic flow theory. *Transportation Research Record*, 1934: 43~52.
- Finnis, K. K. and D. Walton, 2008. Field observations to determine the influence of population size, location and individual factors on pedestrian walking speeds. *Ergonomics*, 51(6): 827~842.
- Fruin, J. J., 1971. *Pedestrian planning and design*.
- Galea, E. R. and J. M. P. Galparsoro, 1994. A computer-based simulation model for the prediction of evacuation from mass-transport vehicles. *Fire Safety Journal*, 22(4): 341~366.
- Garling, T. and G. W. Evans, 1991. *Environment, cognition, and action: An integrated approach*. Oxford University Press.
- Gerdelan, A. and C. O'Sullivan, 2010. A genetic-fuzzy system for optimising agent steering. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 21(3~4): 453~461.
- Gim, T.-H. T. and J. Ko, forthcoming. Maximum likelihood and Firth logistic regression of the pedestrian route choice: a case of Seoul, South Korea. *International Regional Science Review*.
- Gipps, P. G. and B. Marksjo, 1985. A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27(2~3): 95~105.
- Golledge, R. G., A. J. Ruggles, J. W. Pellegrino and N. D. Gale, 1993. Integrating route knowledge in an unfamiliar neighborhood: Along and across route experiments. *Journal of Environmental Psychology*, 13(4): 293~307.

- Guo, Z., 2009. Does the pedestrian environment affect the utility of walking? A case of path choice in downtown Boston. *Transportation Research Part D*, 14(5): 343~352.
- Guo, Z. and B. P. Y. Loo, 2013. Pedestrian environment and route choice: evidence from New York City and Hong Kong. *Journal of Transport Geography*, 28: 124~136.
- Hall, E. T., 1966. *The hidden Dimension*. Garden City.
- Harris, C. and N. Dines, 1988. *Time-saver standards for landscape architecture*. Mcgraw-Hill.
- Helbing, D., 1992. A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6: 391~415.
- Helbing, D. and P. Molnar, 1995. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5): 4282~4286.
- Helbing, D. and P. Molnar, 1998. Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *Self-organization of complex structures: from individual to collective dynamics*, Gordon and Breach.
- Henderson, L. F., 1974. On the fluid mechanic of human crowd motions. *Transportation Research*, 8: 509~515.
- Hill, M. R., 1982. Spatial structure and decision-making of pedestrian route selection through an urban environment. Ph.D. thesis, University of Nebraska-Lincoln.
- Hoogendoorn, S. P., 2001. *Normative pedestrian flow behavior: Theory and Applications*, Delft University of Technology.
- Hoogendoorn, S. P. and P. H. L. Bovy, 2004. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, 38(2): 169~190.
- Hoogendoorn, S. P., P. H. L. Bovy and W. Daamen, 2002. Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*: 123~154.

- Huang, L., S. C. Wong, M. Zhang, C.-W. Shu and W. H. K. Lam, 2009. Revisiting Hughes' dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm. *Transportation Research Part B*, 43(1): 127~141.
- Hughes, R. L., 2002. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B*, 36(6): 507~535.
- Ishaque, M. M. and R. B. Noland, 2008. Behavioural issues in pedestrian speed choice and street crossing behaviour: A Review. *Transport Reviews*, 28(1): 61~85.
- Kirchner, A., H. Klupfe, K. Nishinari, A. Schadschneider and M. Schreckenberg, 2004. Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics. *Journal of Statistical Mechanics*, 2004: 10011.
- Kitazawa, K. and M. Batty, 2004. Pedestrian behaviour modelling: An application to retail movements using a genetic algorithm. In seventh international conference on design and decision support systems in architecture and urban planning.
- Kitazawa, K. and T. Fujiyama, 2009. Pedestrian vision and collision avoidance behavior: investigation of the information process space of pedestrians using an eye tracker. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*: 95~108.
- Knoblauch, R., M. Pietrucha and M. Nitzburg, 1996. Field studies of pedestrian walking speed and start-up time. *Transportation Research Record*, 1538: 27~38.
- Lam, W. H. K., J. F. Morrall and H. Ho, 1995. Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. *Transportation Research Record*, 1487: 56~62.
- Li, Y. and H. Tsukaguchi, 2005. Relationships between network topology and pedestrian route choice behavior. *Journal of the*

- Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6: 241~248.
- Lotan, T. and H. Koutsopoulos, 1993. Models for route choice behaviour in the presence of information using concepts from fuzzy set theory and approximate reasoning. *Transportation*, 20(2): 129~155.
- Lovas, G. G., 1994. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B*, 28(6): 429~443.
- Maniccam, S., 2002. Traffic jamming on hexagonal lattice. *Physica A*, 321(3~4): 653~664.
- Marchand, B., 1974. Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment: A French example. *Environment and Planning*, 6(5): 491~507.
- MathWorks, 2014. MATLAB fuzzy logic toolbox: User's guide.
- Matsushita, S. and S. Okazaki, 1991. A study of simulation model for way finding behavior by experiments in Mazes. *Journal of Architecture and Planning*, 429: 51~59.
- Muramatsu, M., T. Irie and T. Nagatani, 1999. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A*, 267(3~4): 487~498.
- Nasir, M., C. P. Lim, S. Nahavandi and D. Creighton, 2014. A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 45: 18~34.
- Okazaki, S., 1979. A study of pedestrian movement in architectural space, Part 1: Pedestrian movement by the application on of magnetic models. *Transactions of Architectural Institute of Japan*, 283: 111~119.
- Okazaki, S. and S. Matsushita, 1981. A study of pedestrian movement in architectural space, Part 5: A proubing walk and a guide walk by a guideboard. *Journal of Architecture and Planning*,

302: 87~93.

- Okazaki, S. and S. Matsushita, 1993. A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. Proceeding of the International Conference in Engineering for Crowd Safety, 1993: 271~280.
- Pan, X., 2006. Computation modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Papadimitriou, E., G. Yannis and J. Golias, 2009. A critical assessment of pedestrian behaviour models. Transportation Research Part F, 12(3): 242~255.
- Pappis, C. and E. Mamdani, 1997. A fuzzy controller for a traffic junction. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 7(10): 707~717.
- Peeta, S. and J. Yu, 2002. A data-consistent fuzzy approach for online driver behavior under information provision. Transportation Research Record, 1803: 76~86.
- Peeta, S. and W. Zhou, 2004. Minimizing truck-car conflicts on highway. JTRP Technical Reports.
- Polus, A., J. Schofer and A. Ushpiz, 1983. Pedestrian flow and level of service. Journal of Transportation Engineering, 109(1): 46~56.
- Robin, T., G. Antonini, M. Bierlaire and J. Cruz, 2009. Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. Transportation Research Part B, 43(1): 36~56.
- Ross, T. J., 1995. Fuzzy logic with engineering applications. McGraw-Hill.
- Seneviratne, P. N. and J. F. Morrall, 1985. Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. Transportation

- Planning and Technology, 10(2): 147~159.
- Seyfried, A., B. Steffen and T. Lippert, 2006. Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica A*, 368(1): 232~238.
- Tarawneh, M. S., 2001. Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors. *Journal of Safety Research*, 32(2): 229~236.
- Teknomo, K., 2002. Microscopic pedestrian flow characteristics: development of an image processing data collection and simulation model. Ph.D. thesis, Tohoku University.
- Teknomo, K., 2006. Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F*, 9(1): 15~27.
- Teodorovic, D. and S. Kikuchi, 1991. Application of fuzzy sets theory to the saving based vehicle routing algorithm. *Civil Engineering Systems*, 8(2): 87~93.
- Teodorovic, D., 1999. Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A*, 33(5): 337~364.
- Timmermans, H., X. Hagen and A. Borgers, 1992. Transportation systems, retail environments and pedestrian trip chaining behavior: Modelling issues and applications. *Transportation Research Part B*, 26(1): 45~59.
- Tsoukalas, L. H. and R. E. Uhrig, 1997. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. Wiley.
- Verlander, N. Q. and B. G. Heydecker, 1997. Pedestrian route choice: An empirical study. *Proceedings of the PTRC European Transport Forum*: 39~49.
- Washington State Department of Transportation, 1997. *Pedestrian facilities guidebook*.
- Weifeng, F., Y. Lizhong and F. Weicheng, 2003. Simulation of

- bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model. *Physica A*, 321(3-4): 633~640.
- Werner, T. and D. Helbing, 2003. The social force model applied to real life scenarios. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, Proceedings of the 2nd International Conference: 17~26.
- Zadeh, L. A., 1975. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8(3): 199~249.
- Zheng, X., T. Zhong and M. Liu, 2009. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, 44(3): 437~445.
- Zhu, W. and H. Timmermans, 2005. Exploring pedestrian shopping decision processes: an application of gene expression programming. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*: 145~154.





※ 각각의 요인에 대한 상세설명은 다음과 같습니다.

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리**

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 속도**

**보행자의 속도**

**보행자의 방향**

**궤와 다른 보행자 또는 장애물의 상대속도**

**보행자의 위치**

**보행자의 움직임**

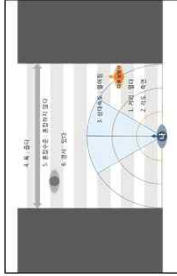
**보행자의 자세**

※ 다음의 요인, 가장상점에서 궤와 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 5점 척도로 응답해 주세요.

**응답 예 :** 다른 보행자 또는 장애물로 인해 불편함을 느껴 궤와 보행속도 또는 방향을 수정할 확률이 100%일 경우,

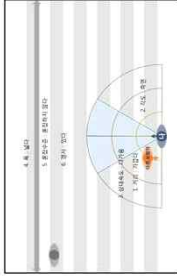
①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

5. (선행) 1) 다음의 가장상점에서 궤와 함께 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리가 짧고, 궤의 속도에 다른 보행자 또는 장애물이 있으며, 다른 보행자 또는 장애물은 궤와 함께 걷는 방향으로 이동한다. 현재 보행길은 직선이며, 혹은 짧다. 그리고 모든 답이 없다.



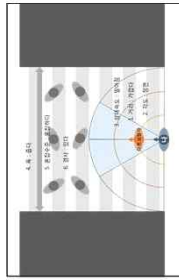
①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

6. (선행) 2) 다음의 가장상점에서 궤와 함께 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.  
궤와 다른 보행자 또는 장애물의 거리가 가깝고, 궤의 속도에 다른 보행자 또는 장애물이 있으며, 다른 보행자 또는 장애물은 궤와 함께 걷는 방향으로 이동한다. 현재 보행길은 직선이며, 혹은 짧다. 그리고 모든 답이 없다.



①	②	③	④	⑤
속도 또는 방향을 수정할 가능성이 거의 없다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 낮다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 있다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 높다.	속도 또는 방향을 수정할 가능성이 매우 높다.

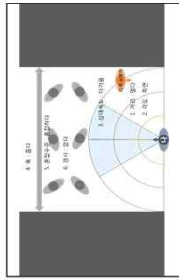
7. (상환 3) 다음의 가상상황에서 귀하가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

[illegible]

①	속도 또는 범람을 수정할 가능성이 있 습니다.	②	속도 또는 범람을 수정할 가능성이 있 습니다.	③	속도 또는 범람을 수정할 가능성이 있 습니다.	④	속도 또는 범람을 수정할 가능성이 있 습니다.	⑤	속도 또는 범람을 수정할 가능성이 있 습니다.
---	---------------------------------	---	---------------------------------	---	---------------------------------	---	---------------------------------	---	---------------------------------

8. (상황 4) 다음의 가상상황에서 귀하가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

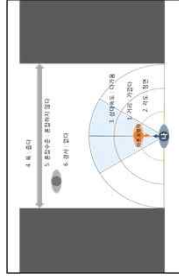
과파와 다른 포항(또는 자아물)의 자리가 있고, 과파의 측면 다른 포항(또는 자아물)이 있으며, 다른 포항(또는 자아물)이 있다. 한편 포항은 인공적으로 이용한다.



①	속도 또는 방향을 수행할 가능성이 있 다.	②	속도 또는 방향을 수행할 가능성이 있 다.	③	속도 또는 방향을 수행할 가능성이 있 다.	④	속도 또는 방향을 수행할 가능성이 있 다.	⑤	속도 또는 방향을 수행할 가능성이 있 다.
---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------

9. (심화 5) 다음의 가상사회에서 각자가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

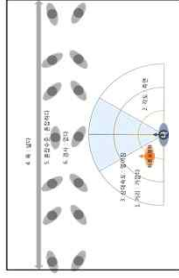
다만 이 두 가지의 차이점은, 한쪽은 인공적으로 만들어진 것이고 다른 하나는 자연적으로 형성된 것이라는 점이다.



(1)	속 노 비 댕 밭	수평 밭	수평 밭
(2)	속 노 비 댕 밭	수평 밭	수평 밭
(3)	속 노 비 댕 밭	수평 밭	수평 밭
(4)	속 노 비 댕 밭	수평 밭	수평 밭
(5)	속 노 비 댕 밭	수평 밭	수평 밭

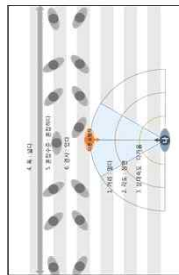
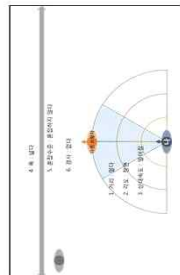
10. (상황 6) 다음의 가상상황에서 귀하가 현재 보행속도 또는 방향을 수정하고 싶은 정도를 응답해주세요.

과하와 다로 포해저(또는 차이물)의 저리가 기압과 구하의 속도에 비례하여 포해저(또는 차이물)의 높이를 결정한다. 그리고 기압과 구하의 속도에 비례하여 포해저(또는 차이물)의 높이를 결정한다.



①	속도 또는 범람을 수행할 가능성이 적 다.	②	속도 또는 범람을 수행할 가능성이 낮 다.	③	속도 또는 범람을 수행할 가능성이 모 두 낮다.	④	속도 또는 범람을 수행할 가능성이 모 두 낮다.	⑤	속도 또는 범람을 수행할 가능성이 모 두 낮다.
---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	----------------------------------	---	----------------------------------	---	----------------------------------

11. 성할 때 다음의 가정하에서 귀하가 현재 포획 또는 병상을 수병하고 싶은 장소를 언급해주세요.

[illegible]

①	속도 또는 비행을 수행할 가능성이 있 다.	②	속도 또는 비행을 수행할 가능성이 있 다.	③	속도 또는 비행을 수행할 가능성이 있 다.	④	속도 또는 비행을 수행할 가능성이 있 다.	⑤	속도 또는 비행을 수행할 가능성이 있 다.
---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------

## Abstract

# Modeling Pedestrian Movement Behavior based on Decision Making Process

Han, Myungjoo

Department of Environmental Planning  
Graduate School of Environmental Studies  
Seoul National University

Walking has come to be actively practiced as a sustainable and environment-friendly means. This has deepened the perception of the design and operation of pedestrian spaces. In addition, interest in pedestrian behavior has increased, and the need for a pedestrian space evaluation tool that reflects pedestrian behavior has emerged.

Pedestrian behavior is classified into strategic, tactical, and operational levels in accordance with pedestrian behavior selection stages (hierarchical structure of decision-making) and into the macroscopic approaches and the microscopic approaches in accordance with units of pedestrian analysis. Though research from the macroscopic approaches has been widely used, thanks to its simple model structure and ready applicability, it fails to consider the interactions among pedestrians. In recent years there has been active research from the microscopic approaches on individual pedestrian units, but most of these studies overlook that fact that pedestrian

behavior consists of pedestrians' decision-making process

This study developed a pedestrian movement behavior model that reflects individual pedestrian units' decision-making process, which is the basis of pedestrian behavior, and materialized on Pedestrian Simulator (P-Sim). P-Sim evaluates the pedestrian behavior at the strategic, tactical, and operational levels and therefore can be used effectively to evaluate pedestrian spaces.

The pedestrian movement behavior model in this study corresponds to the operational level and signifies individual pedestrian units' behavior of selecting the direction or speed. The pedestrian movement behavior model consists of five main characteristics. First, it realizes the microscopic behavior of individual pedestrian units. Second, pedestrians are intelligent agents who perform decision-making on their own. Third, this study used a fuzzy inference approach because pedestrian movement behavior is a decision-making process and is characterized by individuals' subjectivity, uncertainty, and ambiguity. Fourth, the impact range of pedestrian movement behavior is established with human vision as the standard. Finally, pedestrian movement behavior is classified into two stages: the decision-making level and the reaction level. The decision-making level consists of the process of deriving the modifiability of pedestrians' direction or speed in accordance with environmental factors and individual characteristics, and modifiability is calculated through the if-then rule, membership function, fuzzy operation, and defuzzification process. The reaction level consists of the process of realizing actual movement in consideration of modifiability at the decision-making level, and this study used the Social Force Model.

For a more sophisticated and objective pedestrian movement behavior model, this study constructed a pedestrian movement

behavior decision-making process based on SP surveys. A binary logit model was used, and, in accordance with the results of the analysis, pedestrians' individual characteristics (gender, age, purpose of the trip), social environmental factors (distances from obstacles, angles at which obstacles are located, relative velocity), and physical environmental factors (widths of pedestrian spaces) were selected as factors affecting pedestrian behavior. Based on the analysis result, the modifiability of pedestrians' direction or speed increased when: pedestrians were male rather than female; they were younger; they were on trips for business or work; their distances from obstacles were smaller; or they were directly faced with obstacles. Statistically significant variables were selected as the influence factors of fuzzy inference, and an if-then rule was generated through the relationship between the explanatory variables and the dependent variables. In addition, the researcher sought to construct a more realistic model by generating a membership function of fuzzy inference through an investigation of the pedestrian movement behavior characteristics and avoiding actual obstacles.

Finally, validation and evaluation were conducted by realizing the model developed on P-Sim and comparing the results with field investigation data. As for the field investigation data, video recordings of the pedestrian flow survey in Seoul in 2012 were used. The validation of the model consisted largely of comparisons of both characteristics of the macroscopic pedestrian traffic flow, which is an aggregate of individual data, and the individual pedestrian units' behavior. With the speed, density, and pedestrian traffic volume, which are characteristics of the macroscopic pedestrian traffic flow, the model and observational data were compared. In addition, the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Theil's

inequality coefficient were used as the evaluation indices here. As for the validation of the individual behavior, the distribution of both the speed and changes in the movement direction were calculated based on pedestrian trajectories, and the identity of distribution in both the model and observations were examined through validation. According to the results of the analysis, this model, which takes individual pedestrian units' decision-making process into consideration, was analyzed to explicate the characteristics and phenomenon of the macroscopic pedestrian traffic flow. The distribution of individual behavior likewise was identical for both the model and observations.

Admittedly, research on pedestrian traffic has been relatively marginalized in comparison with that on vehicular traffic in the field of transportation. The most basic means of transportation that humans can select, walking occurs at the beginning and end of all trips. In addition, walking performs the function of creating benefits in diverse aspects (individual, regional, and national levels) besides the field of transportation. Many have come to agree on the importance of walking in recent years and reflecting on such changes, this study developed a pedestrian movement behavior model for the microscopic analysis of pedestrian spaces. A model based on human thought, the model is expected to be overcome existing limitations and to be applicable in diverse ways to the stage of planning and operating pedestrian spaces. In addition, without being restricted simply to the capacity analysis of pedestrian spaces, it is expected to be able to analyze the various and subtle effects of changing pedestrian spaces, such as the effects of introducing new pedestrian facilities or pedestrian policies.

**Keywords:** pedestrian movement behavior, decision-making

process, Fuzzy Inference, Social Force Model, binary  
logit model, pedestrian simulator

*Student Number: 2006-31010*